



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**ANALÝZA VLIVU PŘESAHU NA PEVNOST SVAROVÉHO
SPOJE SOUČÁSTI Z KOMPOZITU**

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PRESSING FORCE ON THE WELD JOINT STRENGTH OF THE
COMPOSITE COMPONENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Litera

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Jan Litera**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce: **Ing. Petr Vosynek, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza vlivu přesahu na pevnost svarového spoje součásti z kompozitu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zaměřuje do odvětví testování polymerních dílů svařovaných pomocí laserového paprsku. Téma vychází z praxe, kdy je potřeba zajistit dostatečnou pevnost svaru. Pevnost svarového spoje závisí na velikosti lisovací síly, respektive přesahu svařovaných součástí. Dosavadní nastavení lisovací síly se odladilo experimentálně pro každou součást. Cílem této práce je analyzovat vztah mezi lisovací silou a pevností svaru pomocí experimentálního modelování na konkrétní součásti, a dále využít těchto znalostí k predikování pevnosti pomocí výpočtového modelování.

Cíle diplomové práce:

- rešeršní studie (svařování nekovových materiálů, přístupy k hodnocení pevnosti svařovaných součástí),
- experimentální modelování (návrh měření, tvorba vzorků, provedení měření, zpracování výsledků),
- výpočtové modelování (tvorba výpočtového modelu, statická strukturní analýza),
- analýza výsledků,
- diskuze nad možnostmi predikce pevnosti svarových spojů pomocí výpočtového modelování,

Seznam doporučené literatury:

GUEDES, R. M.: Creep and fatigue in polymer matrix composites. Philadelphia, PA: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-1-84569-656-6.

TSOI, B., E. M. KARTASHOV a V. V. SHEVELEV.: The statistical nature of strength and lifetime in polymer films and fibers. Boston: VSP, 2004. ISBN 90-676-4399-8.

DOWLING, N. E.: Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 4th ed. Boston: Pearson, c2013. ISBN 01-313-9506-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Poděkování:

Rád bych poděkoval svému školiteli Ing. Petru Vosynkovi Ph.D. za pomoc a cenné rady při psaní této práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni Janičce za obrovskou podporu při studiu.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Analýza vlivu přesahu na pevnost svarového spoje součástí z kompozitu“ vypracoval samostatně po konzultacích s vedoucím práce. Vycházel jsem ze svých znalostí získaných předchozím studiem a čerpal z literárních a internetových zdrojů.

Brno 2020

.....

Bibliografická citace

LITERA, Jan. *Analýza vlivu přesahu na pevnost svarového spoje součásti z kompozitu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125414>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Vosynek.

Klíčová slova:

Laserové transmisivní svařování kompozitů, experimentální modelování, MKP

Keywords:

Laser transmission welding of composites, experimental modeling, FEM

Abstrakt:

V současnosti jsou výrobky z kovových materiálů stále více nahrazovány výrobky z plastů nebo kompozitů s polymerní matricí. S tím je spojena problematika výrobních procesů jako např. lisování nebo svařování, tzn. vliv procesních parametrů na výstupní vlastnosti výrobku.

Předkládaná práce se zabývá problematikou kombinace lisování a svařování součástí z kompozitu, konkrétně vlivem lisovacího přesahu na pevnost a těsnost svarového spoje. První část je zaměřena na rešerši dostupné literatury týkající se řešeného problému. Druhá část se zabývá řešením problému pomocí experimentálního modelování. Součástí této části je i zahrnutí výpočtového modelování při návrhu experimentu, detailní měření podstatných rozměrů, mikrotomová analýza a statistické zpracování a vyhodnocení. Třetí část se zaměřuje na tvorbu metody pro hodnocení pevnosti svaru na základě lisovacího přesahu pomocí výpočtového modelování. Podstatná je i validace výpočtového modelu na základě předchozího experimentálního měření. Na závěr jsou prezentovány dvě metody pro hodnocení pevnosti svaru. První funguje na základě výpočtového modelování a druhá na základě experimentálního modelování. Zároveň je poukázáno na předpoklady použití vytvořených metod a jejich nedostatky. Dále jsou popsány možnosti jejich implementace při prvotním návrhu svarového spoje a návrh na další postup.

Abstract:

Nowadays, components made of metallic materials are increasingly being replaced by components made of plastics or composites with a polymer matrix. This is associated with the issue of production processes such as pressing or welding, i.e. the influence of process parameters on the output properties of the product.

The presented thesis deals with the issue of the combination of pressing and welding of a composite part, specifically the influence of the pressing overlap on the strength and tightness of the welded joint. The first part is focused on a search of available literature related to the problem. The second part deals with solving the problem using experimental modeling. Part of this chapter is inclusion of computational modeling in the design of experiment, detailed measurement of essential dimensions, microtome analysis and statistical processing and evaluation. The third part focuses on the creation of a method for evaluating the strength of the weld based on the pressing overlap using computational modeling. Essential part is also validation of the computational model based on previous experimental measurements. Finally, two methods for evaluation of the weld strength are presented. The first works on the basis of computational modeling and the second on the basis of experimental modeling. At the same time, the presumptions of usage of the created methods and their drawbacks are pointed out. Furthermore, the possibilities of their implementation in the initial design of the welded joint and the proposal for the next procedure are described.

1	ÚVOD.....	11
2	ANALÝZA PROBLÉMOVÉ SITUACE.....	12
2.1	Problémová situace	12
2.2	Formulace problému	12
2.3	Formulace cílů práce	13
3	VYMEZENÍ POJMŮ	14
4	NEKOVOVÉ MATERIÁLY	15
4.1	Plasty – teoretický základ.....	15
4.2	Kompozity s termoplastickou matricí.....	17
5	REŠERŠNÍ STUDIE.....	18
5.1	Metody svařování nekovových materiálů	18
5.2	Laserové transmisivní svařování.....	21
5.3	Vady svarových spojů nekovových materiálů	23
5.4	Experimentální modelování svarových spojů nekovových materiálů	23
5.5	Výpočtové modelování svarových spojů nekovových materiálů	23
5.6	Vliv přidržovacího tlaku na pevnost svarového spoje	24
5.7	Přístupy k hodnocení pevnosti svařovaných nekovových součástí	27
5.8	Metodika IIW	30
6	ANALÝZA PROBLÉMU	33
6.1	Popis soustavy, na které je problém řešen.....	33
6.2	Postup řešení problému	35
7	SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN	36
7.1	Systém podstatných veličin pro experimentální modelování.....	37
7.2	Systém podstatných veličin pro výpočtové modelování	37
7.3	Ostatní podstatné jevy a skutečnosti.....	38
8	VÝBĚR METODY PRO ŘEŠENÍ PROBLÉMU	39
8.1	Metoda řešení	39
8.2	Použité zařízení a software.....	39
9	EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ – PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	41
9.1	Použitý materiál	41
9.2	Vstřikování zkušebních těles.....	42
9.3	Lisování.....	47
9.4	Svařování.....	50
10	STATICKÁ ZKOUŠKA – VYTLAČOVÁNÍ.....	53
10.1	Realizace procesu řešení.....	53
10.2	Prezentace výsledků experimentálního měření.....	56
10.3	Analýza výsledků experimentálního měření	59
11	TLAKOVÁ DESTRUKČNÍ ZKOUŠKA.....	61
11.1	Realizace procesu řešení.....	61
11.2	Prezentace výsledků experimentálního měření.....	62

11.3	Analýza výsledků řešení	62
12	VÝPOČTOVÝ MODEL LISOVÁNÍ – TVORBA DÍLČÍCH MODELŮ	63
12.1	Úvod k výpočtovému modelování.....	63
12.2	Model geometrie.....	64
12.3	Model materiálu	67
12.4	Model styku těles.....	70
12.5	Model sítě konečných prvků	71
12.6	Model okrajových podmínek	72
12.7	Nastavení řešiče.....	75
13	DÍLČÍ VÝSLEDKY VÝPOČTOVÉHO MODELU LISOVÁNÍ.....	76
13.1	Porovnání výsledné reakční síly z výpočtového modelu s experimentem.....	76
13.2	Porovnání deformace tubusu v radiálním směru (osa x)	76
13.3	Porovnání rozložení kontaktního tlaku mezi přístupy 1 a 2	77
14	ÚPRAVA VÝPOČTOVÉHO MODELU LISOVÁNÍ	79
14.1	Úprava modelu okrajových podmínek	79
14.2	Porovnání deformace tubusu v radiálním směru po aplikaci teploty.....	79
14.3	Prezentace výstupů z výpočtu	79
15	VÝPOČTOVÝ MODEL VYTLAČOVÁNÍ – TVORBA DÍLČÍCH MODELŮ	82
15.1	Shrnutí dosažených výsledků.....	82
15.2	Model geometrie.....	82
15.3	Model materiálu	83
15.4	Model styku těles.....	84
15.5	Model sítě konečných prvků	85
15.6	Model okrajových podmínek	85
15.7	Nastavení řešiče.....	86
16	PREZENTACE VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ – VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ.....	87
16.1	Postup zpracování výsledků.....	87
16.2	Prezentace výsledků.....	88
17	ANALÝZA VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ – VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ.....	90
17.1	Analýza dosažených výsledků.....	90
17.2	Metoda hodnocení statické pevnosti svarového spoje nekovových materiálů	91
18	IMPLEMENTACE VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ.....	93
18.1	Implementace výsledků experimentálního modelování	93
18.2	Implementace výsledků výpočtového modelování	93
18.3	Náměty k další práci	93
19	ZÁVĚR.....	94
20	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	97
21	SEZNAM TABULEK.....	98
22	SEZNAM OBRÁZKŮ	99
23	SEZNAM PŘÍLOH	101

A – PARAMETRY STROJŮ A ZAŘÍZENÍ.....	102
B – DODATEK K EXPERIMENTÁLNÍMU MODELOVÁNÍ	104
C – DODATEK K VÝPOČTOVÉMU MODELOVÁNÍ.....	109
D – MOLDFLOW ANALÝZA.....	113
E – VYHODNOCENÍ TVAROVÉHO NAPĚTÍ.....	115

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

T	Teplota	[°C]
T_g	Teplota skelného přechodu	[°C]
T_f	Teplota viskózního toku	[°C]
T_m	Teplota tání	[°C]
T_{IN}	Teplota vstřikování	[°C]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
G	Modul pružnosti ve smyku	[MPa]
μ	Poissonův poměr	[-]
σ	Smluvní napětí	[MPa]
ε	Smluvní přetvoření	[-]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
σ_{ex}	Tvarové napětí	[MPa]
σ_{PL}	Limitní napětí - podélný směr	[MPa]
ε_{PL}	Limitní přetvoření - podélný směr	[-]
R	Parametr asymetrie cyklu	[-]
t_V	Doba vstříku	[s]
t_C	Doba chladnutí	[s]
t_w	Doba svařování	[s]
Q	Průtok	[cm ³ /s]
p_{IN}	Vstřikovací tlak	[MPa]
δ_R	Relativní chyba	[%]
F	Síla	[N]
F_h	Přidržovací síla	[N]
v	Rychlost zatěžování	[mm/min]
f_{VZ}	Vzorkovací frekvence	[ms]
α	Hladina významnosti	[-]
f	Součinitel tření	[-]
k	Směrnice přímky	[-]
q	Parametr přímky	[-]
δ	Přesah	[mm]

MKP	Metoda konečných prvků
LTW	Laser transmission welding (Laserové transmisivní svařování)
AISC	American Institute of Steel Construction
DVS	Die Verbindungs Spezialisten
DIN	Deutsches Institut für Normung
AWS	American Welding Society
FIN K	Součinitel intenzity napětí
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
DNV	Det Norske Veritas
IIW	International Institute of Welding
FEMFAT	Finite element method fatigue
ČSN	Československé (České) technické normy
MFA	Moldflow analysis - analýza vstřikování
OP	Okrajové podmínky
LSS	Lokální souřadný systém
GSS	Globální souřadný systém

PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PC	Polykarbonát
PPA	Polyftalamid
PA	Polyamid

1 ÚVOD

V současné době je v průmyslu snaha o co nejvyšší kvalitu výrobku. Ta je podle ČSN ISO 8402 definována jako celkový souhrn znaků, charakteristik, parametrů apod. výrobku, které ovlivňují schopnost uspokojovat stanovené a předpokládané potřeby. Je obecně určována:

- Ekonomickými složkami – náklady
- Užitnými vlastnostmi – znaky jakosti (funkce, ekologie, spolehlivost, apod.)

Nejčastější způsob zvyšování kvality je snaha o dosažení nižších nákladů při stejných nebo lepších užitných vlastnostech výrobku.

V automobilovém průmyslu se dosahuje snížení nákladů například nahrazením kovových materiálů plasty. Dnešní automobil se skládá z přibližně 30 000 komponent [1] a 1/3 z nich je vyrobena z plastů nebo z kompozitů na bázi plastů¹. Jedná se např. o nádržové čerpadlové moduly, plynové pedály, sací moduly, aktuátory, palivové pumpy nebo škrtkové klapky.

S výrobou výše uvedených produktů je spojeno mnoho procesů: vstřikování, lisování, svařování, apod. Právě svařování plastových nebo kompozitních materiálů má mnoho dosud neprozkoumaných oblastí a parametry, které celý proces a výslednou kvalitu² svaru ovlivňují, jsou často odladěny experimentálně. Jednou z velmi často využívaných svařovacích metod je tzv. laserové transmisivní svařování (dále pouze LTW – laser transmission welding).

Jedním z parametrů, které významně ovlivňují kvalitu svaru při LTW, je velikost kontaktního tlaku, který vzniká mezi svařovanými díly při svařování. Předkládaná práce se zabývá právě problematikou kontaktního tlaku mezi díly při svařování metodou LTW a jeho vlivu na kvalitu svarového spoje.

¹ Kompozit na bázi plastů – termoplastická matrice vyztužená skelnými vlákny

² Kvalita svaru – zejména těsnost a pevnost (statická, únavová, *creepová*)

2 ANALÝZA PROBLÉMOVÉ SITUACE

2.1 Problémová situace

Kontaktní tlak mezi svařovanými součástmi vzniká buď přitlačením svařovaných objektů upínacím přípravkem při svařování, nebo nalisováním dílů s přesahem, které předchází samotnému svařování. Druhý způsob je v sériové výrobě častější. Důvodem jsou obecné tvary svařovaných součástí. Pro ně je konstrukčně náročné a někdy až nemožné vytvořit upínací přípravky tak, aby zároveň vytvořily tlak mezi svařovanými součástmi.

V současnosti je lisovací přesah pro LTW odladěn experimentálně nebo určen na základě zkušeností. To má za důsledek, že se nejčastěji lisuje s takovou velikostí přesahu, která překračuje velikost postačující. Při jiné šarži materiálu (většinou nižší pevnostní vlastnosti) nebo způsobu vstřikování (odlišná orientace vláken tzn. nižší pevnostní vlastnosti) často dochází při lisování dílů ke vzniku mezního stavu trhliny nebo mezního stavu lomu a tím zvýšené zmetkovitosti.

Z přechozího textu vyplývá, že určení vlivu velikosti přesahu na kvalitu svarového spoje vzniklého pomocí LTW je velmi aktuálním problémem.

2.2 Formulace problému

Progresivní přístup dnešní doby k řešení problémů je založen na modelování, zejména na modelování výpočtovém pomocí metody konečných prvků (MKP). Aplikace výpočtového modelování oproti neustálým experimentálním měřením v praxi výrazně sníží finanční náklady na vývoj nových nebo úpravu stávajících komponent a procesů.

I přes výhody výpočtového modelování je nejdříve nutné vliv přesahu určit experimentálně. Až na základě změřených dat je poté možné vytvořit metodu pro hodnocení statické pevnosti tohoto svarového spoje pomocí výpočtového modelování tak, aby byla použitelná pro obecný svarový spoj vytvořený LTW.

Z předchozího textu vyplývá následující formulace problému:

Provedení analýzy vlivu přesahu na svarový spoj vytvořený metodou LTW pomocí experimentálního modelování. Dále vytvoření metody pro hodnocení statické pevnosti tohoto svarového spoje na základě experimentálního měření pomocí výpočtového modelování.

2.3 Formulace cílů práce

Cíle práce, kterých má být dosaženo, vyplývají z předchozího textu a z konzultací s vedoucím práce a jsou následující:

- Rešeršní studie svařování nekovových materiálů a přístupů k hodnocení pevnosti svařovaných součástí
- Experimentální modelování vlivu přesahu na statickou pevnost a těsnost svarového spoje
- Vytvoření výpočtového modelu pro hodnocení statické pevnosti svarového spoje
- Analýza výsledků
- Diskuze nad možnostmi predikce pevnosti svarových spojů pomocí výpočtového modelování

3 VYMEZENÍ POJMŮ

V práci jsou používány určité pojmy, které je vhodné si vymezit:

- **Pevnost (svaru)** – je souhrnný termín pro několik mezních stavů, z nichž nejdůležitější jsou mezní stav porušení, trhliny, stabilního šíření a lomu. Pevnost podle charakteru zatěžování může být statická, únavová, *creepová*, dynamická apod. V předkládané práci má termín pevnost spíše význam únosnosti. Únosnost svaru je podle AISC největší síla, kterou dokáže svar přenést, aniž by došlo k jeho porušení.
- **Nekovový materiál** – skupinu nekovové materiály obecně tvoří polymery, anorganická skla, keramické materiály, krystalové modifikace uhlíku, dřevo, atd. Svařování pomocí LTW je možné pouze pro termoplasty nebo pro kompozity složené z termoplastické matrice a vyztužené (nejčastěji) skelnými vlákny. Proto je v této práci definice nekovového materiálu zúžena pouze na termoplasty a kompozity složené z termoplastické matrice a skelných vláken.
- **Kompozitní materiál** – kompozity jsou dle [3] definovány takto: „*Složené materiály, skládající se ze dvou či více složek, z nichž každá plní jinou specifickou funkci a má jiné materiálové vlastnosti, většinou značně odlišné.*“ V práci je definice omezena pouze na kompozity sestávající z termoplastické matrice a z výztuže v podobě skelných vláken.
- **Přidržovací tlak** (z ang. *clamping pressure*) – je tlak vyvinutý upínacími čelistmi pro přitlačení svařovaných součástí k sobě.
- **Svařovací tlak** (z ang. *welding pressure*) – tlak, který působí na rozhraní mezi svařovanými součástmi. Vzniká v důsledku přidržovacího tlaku a také teplotní roztažností materiálů při svařování.

4 NEKOVOVÉ MATERIÁLY

Tato kapitola shrnuje podstatné vlastnosti nekovových materiálů z hlediska řešeného problému. Je zaměřena zejména na základní rozdělení nekovových materiálů, jejich svařitelnost, závislost mechanických vlastností na teplotě a výrobu.

4.1 Plasty – teoretický základ

Plasty jsou složeny z polymerních řetězců a dalších přísad jako např. plniva, barviva a stabilizátory. Struktura řetězců je různorodá. Řetězce se rozlišují např. podle počtu typu merů³, uspořádání merů v řetězci, seřazení řetězců apod.

4.1.1 Polymery

Polymerní řetězce jsou vytvořené z makromolekul (opakované spojení merů). Makromolekuly jsou spojeny kovalentními vazbami. Kromě kovalentních vazeb v řetězci působí ještě sekundární vazebné síly (Londonovy, vodíkové můstky apod.).

Polymery lze rozdělit podle úrovně uspořádanosti nadmolekulární struktury:

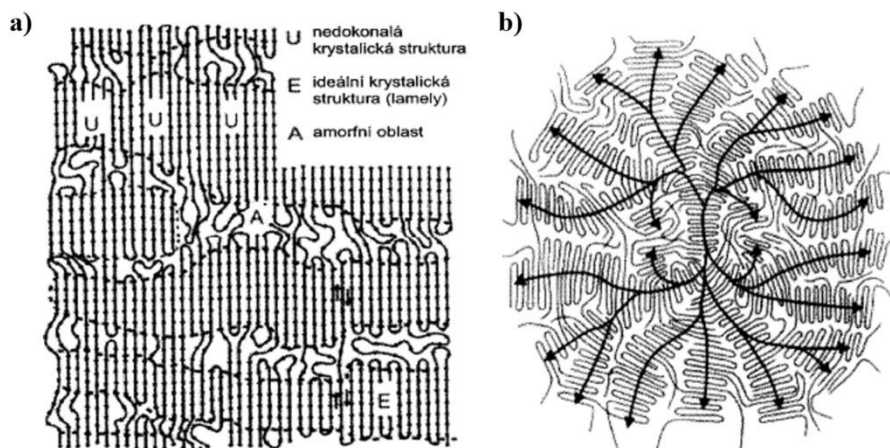
- Amorfni (sklovitý) – neuspořádaná struktura
- Semikrystalický – kombinace krystalické a amorfni (*obr. 4.1a*)

Schopnost polymerů krystalizovat je podmíněna hustým uspořádáním řetězců [4]. Dosažení ideálního krystalického stavu je v praxi nemožné. Ve struktuře polymerů jsou vždy určité defekty např. zauzlení, zaklesnutí řetězců apod., které nedovolují úplnou krystalizaci. Proto se používá označení semikrystalické. Stupeň uspořádanosti polymerů určuje tzv. krystalinita⁴. Nejčastěji se pohybuje od 40 % do 90 %.

Základním útvarem krystalické struktury je lamela. U amorfni struktury jsou to tzv. globuly neboli amorfni klubka (náhodně stočené makromolekuly). Při tuhnutí z taveniny se u reálných objektů vytvářejí tzv. sférolity (*obr. 4.1b*) [4]. Jsou to shluky lamel, které mají společný střed. Z něho se dále rozrůstají.

³ Mer – základní stavební jednotka řetězce

⁴ Krystalinita – poměr mezi krystalickou a amorfni složkou



obr. 4.1 a) semikrystalická struktura; b) sférolit (převzato z [4])

4.1.2 Tranzitní teploty polymeru

Amorfní složka – Teplota skelného přechodu T_g a teplota viskózního toku T_f (obr. 4.2)

- $T < T_g$ – „sklovitý stav“ : omezený pohyb řetězců, polymer je tvrdý a křehký, vysoké hodnoty modulu pružnosti v tahu E (řádově 10^3 až 10^4 MPa)
- $T = T_g$ – stabilní uspořádání řetězce
- $T_f > T > T_g$ – „kaučukovitý stav“: řetězce jsou schopné natažení, výrazný pokles modulu pružnosti (až o 4 řády)
- $T > T_f$ – „stav viskózního toku“: porušení sekundárních vazeb, teplota při které dochází ke zpracování polymerů (vstřikování apod.)

Krystalická složka – Teplota tání T_m (obr. 4.2)

- $T > T_m$ atomy či ionty opouštějí své pozice v krystalové mřížce – pokles modulu pružnosti.

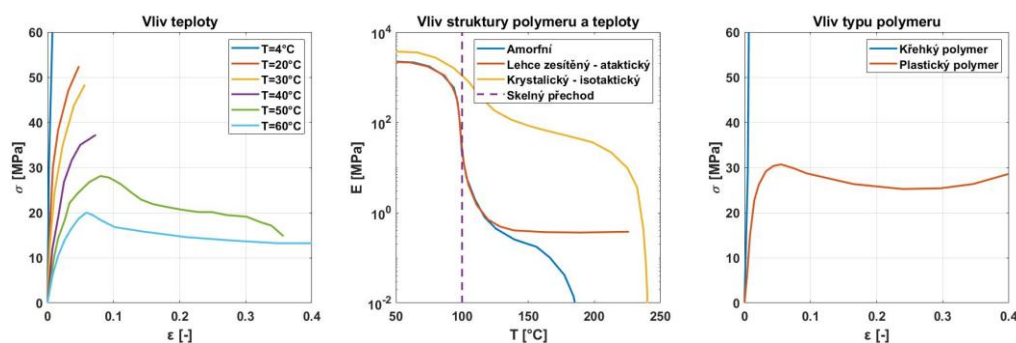
Semikrystalické polymery obsahují jak krystalickou, tak amorfní složku, tzn., že v oblasti skelného přechodu je modul pružnosti vyšší než u čistě amorfních polymerů.

4.1.3 Rozdělení plastů a jejich svařitelnost

- Termoplasty – lze je tvářet opětovným ohřevem, jsou svařitelné, mohou být amorfní nebo semikrystalické
- Reaktoplasty – nelze je tvářet opětovným ohřevem, nejsou svařitelné (v další části již nebudou uvažovány)

4.1.4 Vlivy na mechanické vlastnosti termoplastů

Významné vlivy na mechanické vlastnosti termoplastů jsou (obr. 4.2): struktura, teplota, typ polymeru a rychlost zatěžování (nárůst tuhosti s vyšší rychlostí zatěžování).



obr. 4.2 Vlivy na mechanické vlastnosti termoplastů (převzato z [5])

4.2 Kompozity s termoplastickou matricí

Pro zlepšení mechanických vlastností termoplastů a často i snížení výrobní ceny se používají různá plniva. Plněné plasty splňují podmínku kompozitní struktury, viz *kap. 3*. Proto se plněné plasty budou v této práci označovat jako kompozity. Plniva se dělí na částicová, vyztužující a nanoplňniva [6].

V automobilovém průmyslu se nejčastěji používají vyztužující plniva, konkrétně skelná vlákna. Tato plniva zvyšují pevnost, tuhost, tvarovou stálost a odolnost k toku za studena [6]. Na druhou stranu snižují tažnost, houževnatost, smrštění a kluzné vlastnosti (zkřehnutí). Hmotnostní podíl skelných vláken je v intervalu 5 až 70 %. Termoplastická matrice v kompozitu chrání a spojuje výztužná vlákna.

4.2.1 Rozdělení kompozitů

Kompozity s termoplastickou matricí vyztužené vlákny se dělí podle směrovosti vláken

- Jednosměrné – vlákna jsou majoritně orientována v jednom směru
- Mnohosměrné – vlákna mají obecnou orientaci (anizotropie smrštění a mechanických vlastností; smrštění většinou nepřesahuje 0.5 %)

Další dělení je na základě tzv. tvarového poměru (z ang. *aspect ratio*). Ten udává poměr mezi největším (délka - l) a nejmenším (průměr - d) rozměrem vlákna. [6]

- Kompozity s krátkými vlákny – $l/d < 100$ – nejčastěji mnohosměrné
- Kompozity s dlouhými vlákny – $l/d > 100$ – nejčastěji jednosměrné

4.2.2 Vstřikování kompozitů

Výroba kompozitů se v automobilovém průmyslu nejčastěji provádí vstřikováním [6]. Používá se vstřikovací stroj. Jedním z hlavních úkolů je vytvořit homogenní taveninu resp. se k ní co nejvíce přiblížit. Materiál je do vstřikovacího stroje dodáván ve formě granulátu přes násypku. Proces se skládá z posloupnosti následujících jevů:

sušení granulátu – roztavení granulátu – vstřik taveniny do tvarové části formy – dotlačení taveniny – ochlazení taveniny – vyhození výstřiku z formy

5 REŠERŠNÍ STUDIE

Tato kapitola sjednocuje a uspořádává informace z odborných článků, knih, vědeckých prací apod., které souvisí s řešenou problematikou. Analýza níže uvedených zdrojů byla nutná k dostatečnému pochopení problematiky.

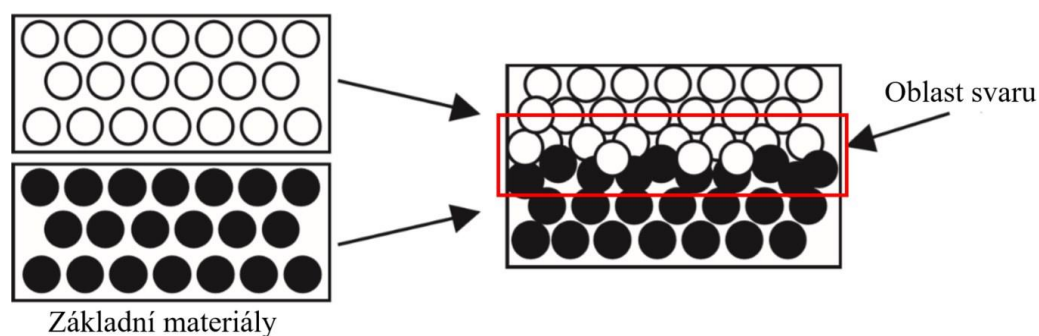
Je nutné podotknout, že cílem této práce je zanalyzovat vliv lisovacího přesahu na vlastnosti svarového spoje vytvořeného metodou LTW. Z tohoto důvodu rešerše neobsahuje poznatky o vlivech jiných procesních parametrů, jako např. doba svařování, výkon paprsku, vlnová délka paprsku apod.

5.1 Metody svařování nekovových materiálů

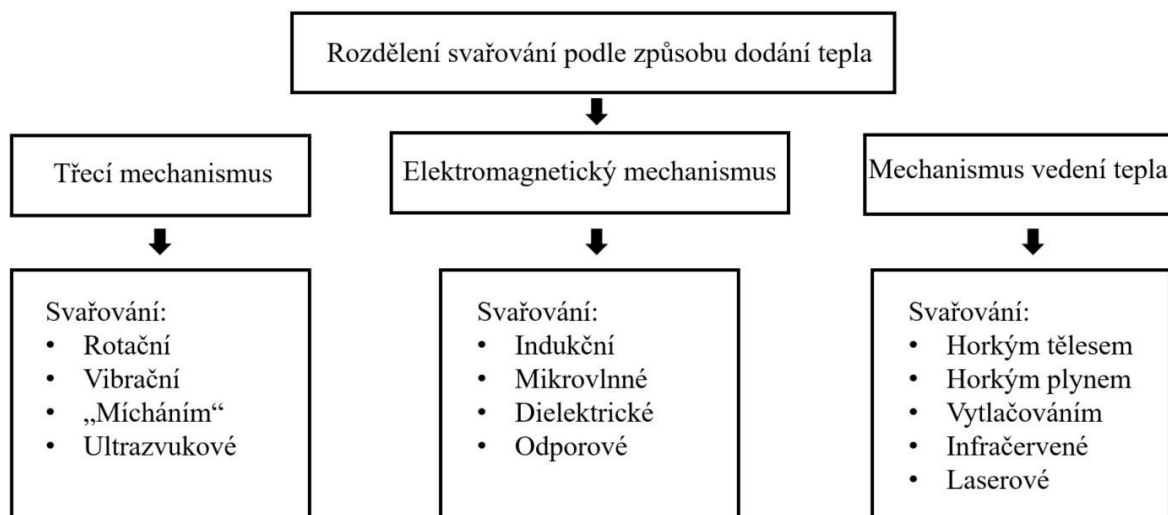
Pro metody svařování nekovových materiálů není vypracováno tolik studií, normativních přístupů apod. jako pro svařování kovů. Mezi metodami svařování nekovových materiálů existuje určitá analogie. Proto bylo nutné pochopit i jiné metody než pouze LTW a provést analýzu, zdali je možné aplikovat získané poznatky o jiných svařovacích metodách na LTW. Hlavní literárním zdrojem kapitoly je [7]. Ostatní zdroje jsou citovány přímo v textu.

5.1.1 Rozdělení svařovacích metod

Společným znakem všech svařovacích metod nekovových materiálů je spojení materiálů (tzv. „*fusion bonding*“ - obr. 5.1) jako důsledek promíchání řetězců na rozhraní v průběhu svařovacího procesu. V případě kompozitů dochází ke spojení pouze matrice a nikoliv vláken. Svar tedy teoreticky vykazuje nižší pevnost než základní materiál. Na základě rešerše bylo vytvořeno rozdělení svařovacích metod podle mechanismu dodání tepla svařovanému rozhraní dvou součástí (obr. 5.2).



obr. 5.1 Princip svařování termoplastů (převzato z [7])



obr. 5.2 Rozdělení svařovacích metod

U všech metod lze obecně rozlišit tři fáze:

- 1) Roztavení polymerní matrice na rozhraní: $T > T_f$ nebo $T > T_m$ (v závislosti na struktuře)
- 2) Přitlačení roztavených povrchů k sobě
- 3) Chladnutí – konsolidace svarového spoje

Druhá fáze při určitých metodách předchází fázi první a trvá po celou dobu procesu.

5.1.2 Třecí mechanismus

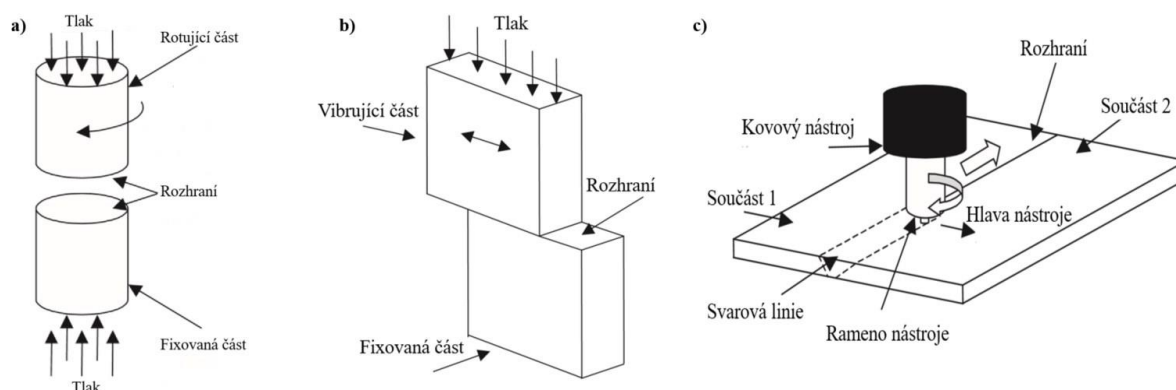
Natavení materiálu na rozhraní svařovaných součástí vzniká důsledkem tření mezi povrchy, které jsou k sobě přitlačené.

Rotační svařování – jedna součást zafixována a druhá je k ní přitlačena a rotuje určitou úhlovou rychlostí (obr. 5.3a). Je vhodná pro vzájemné svařování trubek nebo pro přivaření trubek na rovné desky.

Vibrační svařování – totožné s rotační metodou. Jeden díl je upevněn a druhý vibruje na určité frekvenci paralelně s kontaktním povrchem. Vibrace generují teplo (obr. 5.3b).

Svařování mícháním – součásti jsou přiloženy pevně k sobě. Hlava rotujícího kovového nástroje je zavrtána v místě budoucí svarové linie tak, že se rameno nástroje dotýká povrchů obou součástí. Kovový nástroj se posouvá a rotuje. Rotace způsobuje tření mezi nástrojem a součástmi. Posuvem nástroje se za nástrojem v oblasti spojovací linie materiál promíchává a vytváří se svar (obr. 5.3c). Nevýhodou této metody je u svařování kompozitů lom vláken v důsledku zavrtání hlavy nástroje. Rozsah zlomených vláken lze eliminovat návrhem nástroje.

Ultrazvukové svařování - využívá se vysokých frekvencí pro svaření součástí. Součásti je nutné nejdříve k sobě přitlačit a poté je vystavit vysokým frekvencím. Směr oscilací závisí na typu svaru. Teplo je generováno intermolekulárním třením v materiálu.



obr. 5.3 Třecí mechanismus svařování (převzato z [7])

5.1.3 Elektromagnetický mechanismus

Metody svařování pomocí elektromagnetismu jsou založeny na zahřívání tzv. nosičů z nerezové oceli, feritu, grafitu atd., které jsou vloženy mezi svařované součásti. Působení elektromagnetického pole zahřeje magnetický materiál. Ten následně natavuje okolní polymerní matici. Poté při aplikaci přidržovacího tlaku na svařované díly dojde k difuzi na rozhraní a vzniku svarového spoje. Tyto metody vyjma dielektrického svařování jsou z hlediska řešení problematiky nezájímavé. Důvodem je přítomnost feromagnetického materiálu uvnitř svaru, který mění jeho mechanické vlastnosti.

Dielektrické svařování – polymery s vysokým dielektrickým ztrátovým faktorem převádí určitou část energie elektromagnetického pole na tepelnou energii v průběhu změny polarity pole.

5.1.4 Tepelný mechanismus

Hlavním rozdílem těchto metod oproti ostatním je natavení materiálu vnějším tepelným zdrojem (horký plyn, laser, apod.).

Svařování horkým tělesem – nahřátá kovová deska se vloží mezi svařované součásti. Jakmile dojde k natavení povrchů, deska se vyjme a díly se přitlačí k sobě.

Svařování horkým plynem – horkým plynem se zvýší teplota svařovaného materiálu nad teplotu tavení. Při této metodě se používá přídavného materiálu, který je natavován do drážky vytvořené na povrchu svařovaných součástí. Ty jsou k sobě přitlačeny.

Svařování vytlačováním – princip jako u svařování horkým plynem s tím rozdílem, že přídavný materiál už je natavený a je vytlačován do spoje.

Svařování infračerveným zářením – nekontaktní metoda. Povrchy jsou vystaveny vysoce intenzivnímu infračervenému záření. Jakmile je rozhraní roztavené, odstraní se zdroj záření a díly se k sobě přitlačí, čímž se po vychladnutí vytvoří svarový spoj.

Svařování laserem – nekontaktní metoda. Metoda se také nazývá laserové transmisivní svařování. Je to z toho důvodu, že jedna součást je transparentní (tzv. neviditelná) pro laser

a druhá část je pro něj absorpční. Rozlišuje se ještě tzv. svařování “natupo“, kde jsou obě součásti absorpční. Podrobný popis je v *kap. 5.2*.

Poznámka k svařování tepelným mechanismem: U metod svařování horkým tělesem, plynem a vytlačováním svar spíše připomíná klasický svarový spoj kovových materiálů. Svary vzniklé metodou LTW jsou odlišné (*kap. 5.2.1*). V dalších kapitolách rešerše se tedy tyto metody nebudou uvažovat (výjimka – *kap. 5.3 a 5.4*).

5.1.5 Shrnutí kapitoly

Použitelnost poznatků o jiných metodách než LTW získaných v rámci rešerše je u všech výše uvedených metod, kromě „elektromagnetických“ metod (vyjma diaelektrického) a metod svařování horkým tělesem, plynem a vytlačováním.

5.2 Laserové transmisivní svařování

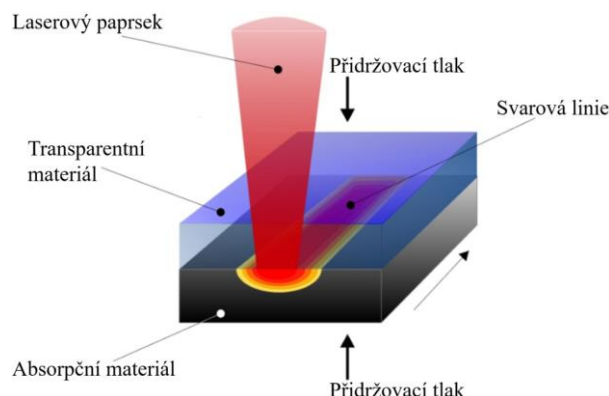
Základním zdrojem této kapitoly je dizertační práce L. S. Mayboudi [8].

LTW je rychlá a nekontaktní metoda (dodání tepla zářením). Svařované součásti musí být v kontaktu již před svařováním. Jedna část je pro laser transparentní tzn., že propouští laserový paprsek. Druhá část je absorpční a energii paprsku vstřebává. Tím dochází k natavení absorpčního materiálu, který následně vedením tepla roztaví i materiál transparentní. Jelikož jsou obě součásti k sobě přitlačené, dojde k promíchání polymerních vláken a po vychladnutí vzniká svarový spoj. Absorpční a propustné vlastnosti svařovaných materiálů jsou u této metody klíčové. Proto se při vstřikování přidávají do polymerní matrice různá aditiva a barviva (nejčastěji: černé barvivo – absorpční materiál; světle zelené barvivo tzv. natural – transparentní materiál). Schéma metody je na *obr. 5.4*. Aplikace LTW je např. v automobilovém, leteckém, textilním a elektronickém průmyslu a medicíně [11].

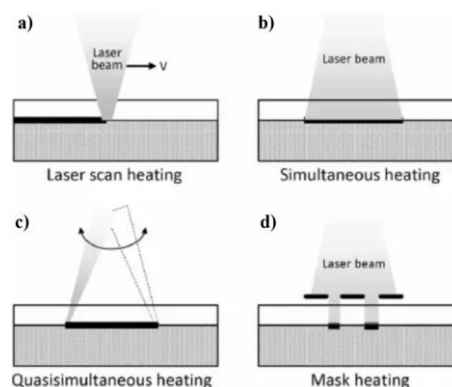
Existují čtyři základní techniky LTW [8]:

- a) konturové (obrysové) – paprsek se pohybuje po naprogramované cestě (*obr. 5.5a*).
- b) simultánní – celá svařovaná oblast je vystavena paprsku v jeden okamžik (*obr. 5.5b*).
- c) kvazi-simultánní – svařování probíhá s takovou rychlostí, že přibližně odpovídá simultánnímu svařování (*obr. 5.5c*).
- d) s maskou – část povrchu svařované součásti je zakrytá tzv. maskou, aby bylo zajištěno, že paprsku bude vystavena pouze předem definovaná oblast (*obr. 5.5d*).

Hlavními procesními parametry jsou: čas svařování, teplota, výkon laseru, tloušťka propustného dílu. S těmi jsou spojeny následující skutečnosti. Při vysoké intenzitě paprsku se polymerní matrice rychle rozkládá (shoří) – průvary. Při teplotách vyšších než je teplota tavení mají termoplasty tendenci hořet namísto vypařování. S rostoucí tloušťkou se snižuje propuštěná energie paprsku a hrozí nebezpečí přehřátí propustného povrchu.



obr. 5.4 Metoda LTW (převzato z [9])



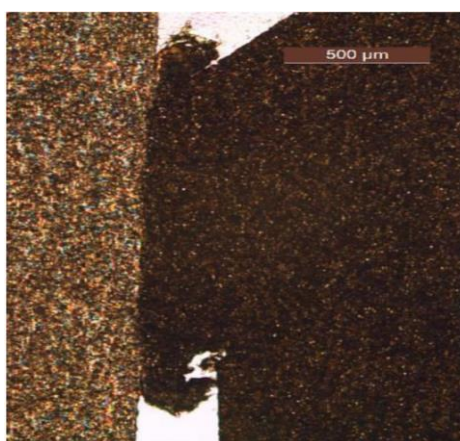
obr. 5.5 Techniky LTW [10]

Metoda LTW má oproti ostatním svařovacím metodám tyto výhody [10]:

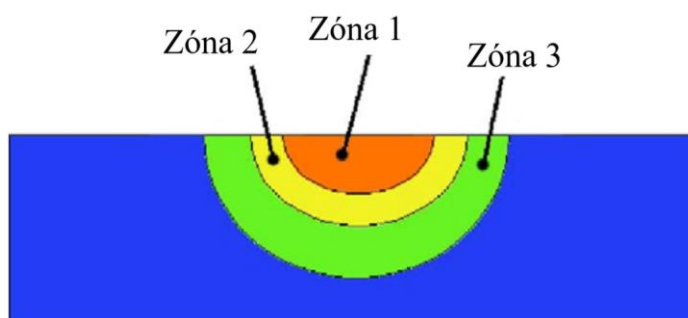
- Nevyžaduje kontakt přípravku s horkým povrchem
- Dodává kontrolované množství energie do svarové oblasti – kontrola teploty, hloubky a velikosti svaru
- Je flexibilní z hlediska svařované geometrie – software řídí pohyb laserového paprsku
- Je možné ji aplikovat do sériové výroby
- Umožňuje jednoduché a rychlé přenastavení na jinou geometrii
- Nižší náklady na upínací přípravky v porovnání s ostatními metodami

5.2.1 Svarový spoj vytvořený metodou LTW

Mikrotomový řez typickým svarem, který je vytvořený metodou LTW, je na obr. 5.6. Z obrázku je patrné, že není rozeznatelná charakteristická svarová oblast (tepelně ovlivněná oblast, změna struktury apod.). Svar v „makro“ pohledu připomíná spíše lepený spoj.



obr. 5.6 Svar vytvořený metodou LTW



obr. 5.7 Rozdělení svaru na zóny na základě teplotního gradientu (převzato z [12])

Přesto lze podle [12] ve svaru rozlišit tři zóny spojené s vysokým gradientem teploty při svařování (obr. 5.7). Rozdělení bylo provedeno pro semikrystalický termoplast PE a PP.

- Zóna 1 – velké zvětšení rozměrů sférolitů, nejvyšší evidovaná teplota v průběhu svařování, během celého procesu je teplota nad teplotou tavení
- Zóna 2 – velikost sférolitů je menší než v zóně 1 stejně jako dosažená teplota, přesto dojde k roztavení materiálu, struktura v této části je podobná jako v zóně 1.
- Zóna 3 – teplota zde dosahuje nejnižších hodnot, přibližně 10 °C pod teplotou tavení, po ochlazení je struktura v zóně stejná jako na počátku procesu.

Podle [8] je přechod mezi zónou 2 a 3 v závislosti na procesních parametrech v hloubce $0.28 \div 0.33$ mm. Touto hranicí lze rozdělit objekt na dvě oblasti: tepelně ovlivněnou a neovlivněnou.

5.3 Vady svarových spojů nekovových materiálů

Normativní dokumenty posuzující jakost svaru nekovových materiálů jsou německá norma DVS 2202-1 (totožné s DIN 32 502) a americká AWS G1.10M. Nevýhodou těchto norem je, že jsou vytvořeny pro metodu svařování vytlačováním a horkým tělesem nebo plynem. Normy pro ostatní metody vytvořené nejsou. Je tedy otázka, zdali je možné tyto normy použít pro hodnocení svaru vzniklého metodou LTW. Podle DVS 2202-1 se vady rozdělují do šesti skupin:

- 1) Trhliny (příčné, podélné, radiální, rozvětvené, uskupení trhlín, mikrotrhliny apod.)
- 2) Dutiny (rovnoměrně rozložené, lokální, rozložené po přímce, táhlé, červí díry, povrchové, vzniklé smršťováním, na konci svarové line)
- 3) Pevné vměstky (cizí pevné částice, oxidovaný nebo shořelý materiál)
- 4) Nedostatečné spojení a provaření
- 5) Tvarové vady (imperfektní tvar, nedostatek materiálu, přetok, konvexita svaru, atd.)
- 6) Ostatní (rozměrové odchylky, tepelné a mechanické poškození svarů)

5.4 Experimentální modelování svarových spojů nekovových materiálů

Stejně jako v *kap. 5.3* ani pro experimentální modelování svarových spojů nekovových materiálů vytvořených metodou LTW neexistuje normativní dokument nebo doporučení. Existující normy jsou vytvořené pro koutové svary vzniklé svařováním horkým tělesem, plynem a vytlačováním. Lze je rozdělit do tří skupin. Žádná z níže uvedených není aplikovatelná na řešenou problematiku.

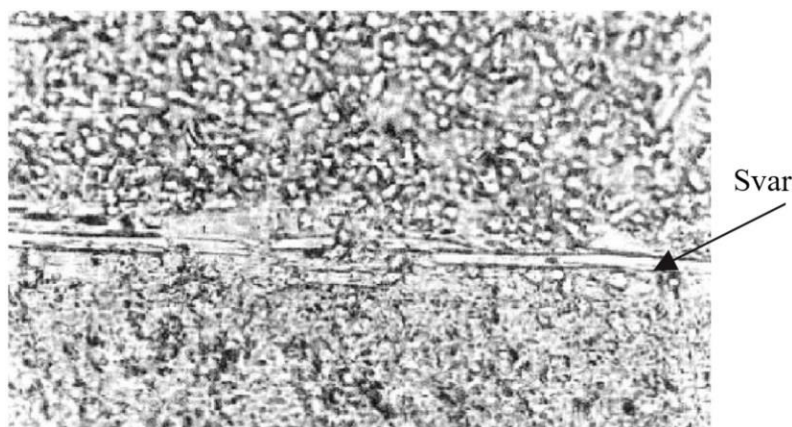
- Testování svarů na základních tělesech (desky a trubky): DVS 2201,2203,2207,2208
- Výpočet tlakových nádob z nekovových materiálů: DIN EN 12573
- Odlupovací test: DIN EN 12814

5.5 Výpočtové modelování svarových spojů nekovových materiálů

Výpočtové modely zabývající se řešenou problematikou v dostupné literatuře nejsou. Studie, v nichž autoři používají výpočtové modelování, jsou zaměřeny pouze na tepelné děje probíhající při svařování a ne na hodnocení svaru jako takového.

5.6 Vliv přidržovacího tlaku na pevnost svarového spoje

Přitlačení svařovaných součástí způsobuje kromě promíchání polymerních vláken také odtok (vytlačení) určitého množství taveniny z rozhraní [7]. V případě kompozitů dochází ke změně orientace vláken (kolmo na směr zatížení) nebo k jejich lomu. Vlákná přestávají přenášet zatížení a působí jako koncentrátoři napětí (*obr. 5.8*). S rostoucí velikostí přidržovacího tlaku roste množství vytlačeného materiálu, počet vláken s novou orientací a počet vláken zlomených. Oproti tomu působením velmi nízkého přitlačného tlaku může docházet k nedostatečnému promíchání vláken podél rozhraní. Všechny výše uvedené jevy snižují pevnost svarového spoje.



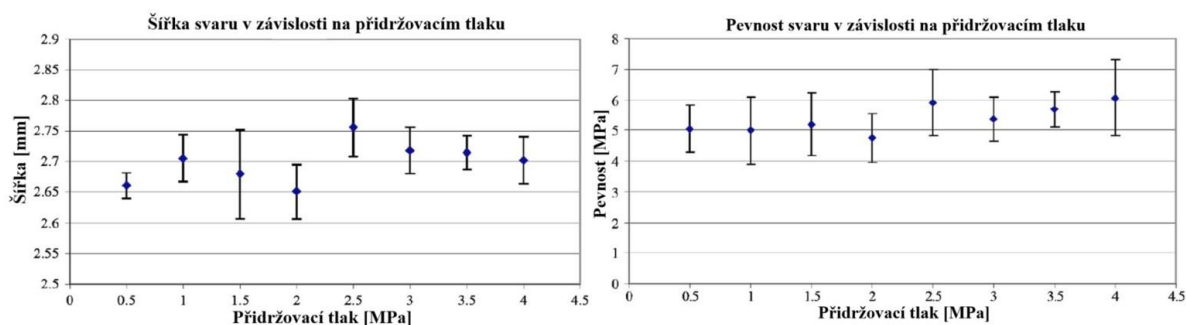
obr. 5.8 Mikroskopický detail svarové oblasti (převzato z [7])

poznámka: materiálem je polyamid vyztužený skelnými vlákny – hmotnostní podíl nebyl uveden

Hodnoty velikosti přidržovacího tlaku jsou rozdílné pro každou součást, materiál a svařovací metodu. Například pro přeplátovaný svarový spoj dvou desek vytvořený ultrazvukovou metodou [13] je interval doporučeného tlaku (0.4;1.2) MPa. Autor neuvádí, pro jaký materiál je tento interval vhodný.

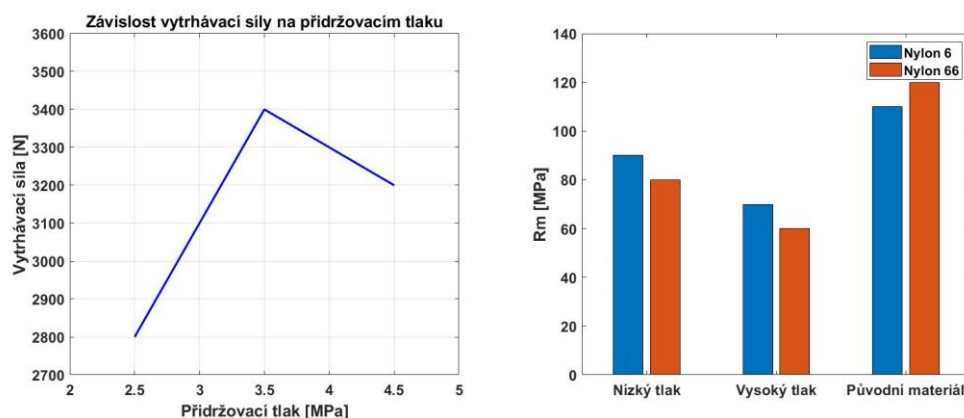
Vlivem přidržovacího tlaku na pevnost svarového spoje se zabývala řada studií. Van de Ven a Erdman [14] experimentálně zjišťovali vliv přidržovacího tlaku na statickou pevnost svarového spoje typu T. Vzorky byly svařeny metodou LTW pro různé tlaky v rozmezí 0.5 až 4 MPa s dělením 0.5 MPa. Ostatní procesní parametry zůstaly konstantní. Celkem testovali 64 vzorků. Autoři vyhodnocovali vliv tlaku na ztenčování svaru po délce (ovlivňuje těsnicí vlastnosti), průměrnou šířku a pevnost svaru a formulovali následující závěry:

- Ztenčování svaru po délce se nevyskytovalo při tlaku nad 2.5 MPa. Při tlaku pod 2.5 MPa se četnost výskytu ztenčování svaru zvyšovala. U tlaku 0.5 MPa vykazovaly tři vzorky z osmi ztenčování svaru.
- Šířka svaru se zvyšovala mezi tlakem 2 až 2.5 MPa. Nad hodnotami tlaku 2.5 MPa došlo ke zmenšení šířky (*obr. 5.9*).
- U statické pevnosti (průměrná hodnota) svaru došlo ke zvýšení mezi tlaky 2 až 2.5 MPa. Každopádně tato změna není významná vzhledem k směrodatné odchylce (*obr. 5.9*).



obr. 5.9 Závislost šířky (vlevo) a pevnosti (vpravo) svaru na přidržovacím tlaku (převzato z [14])

V [15] a [16] Acherjee použil analýzu rozptylu pro analýzu vlivu procesních parametrů u LTW. V závěru uvádí nevýznamný vliv přidržovacího tlaku na statickou pevnost svaru. Ke stejnému závěru došel i van der Straeten [17]. Ten tvrdí, že vliv tlaku na pevnost svarového spoje je nevýznamný do té doby, dokud jsou svařované součásti v kontaktu. Naopak Dabiry [18] uvádí významný nárůst pevnosti při změně z přidržovacího tlaku 2.5 MPa na 3.5 MPa u svarového spoje typu T při ultrazvukovém svařování. Při překročení hodnoty tlaku 3.5 MPa došlo k drobnému poklesu pevnosti (200 N - obr. 5.10).



obr. 5.10 Vliv přidržovacího tlaku na pevnost svarového spoje
vlevo: výsledky z [18]; vpravo: výsledky z [20]

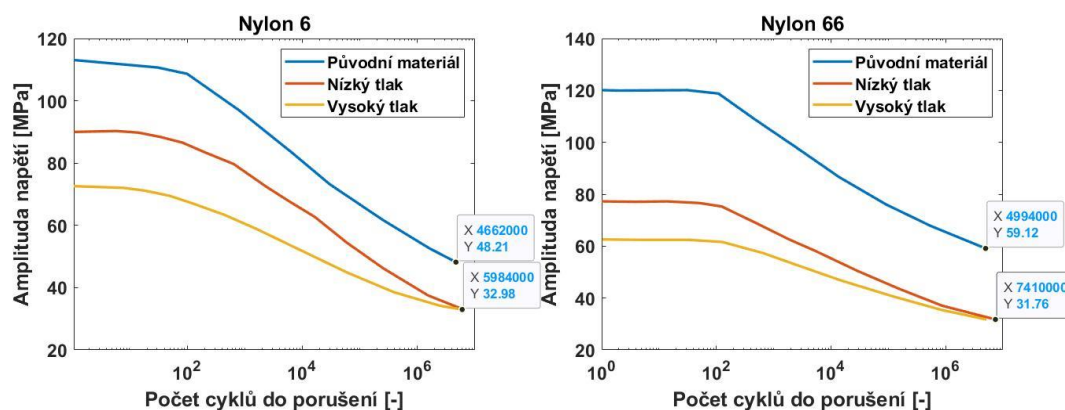
Onken a Hopmann [19] studovali vliv přidržovacího tlaku na pevnost neplněného amorfního termoplastu. Uvádí, že s vyšším přidržovacím tlakem klesá statická pevnost svaru. Jev vysvětlují tím, že vyšší přidržovací tlak generuje vyšší kontaktní tlak na rozhraní, který brání polymerním řetězcům v difuzi na hranici, a proto se snižuje pevnost svaru. Autoři bohužel neuvádí použitou svařovací metodu.

Tsang v [20] popisuje vliv tlaku na statickou a únavovou tahovou pevnost svaru vytvořeného vibrační metodou. Testoval vzorky ze dvou materiálů:

- 1) Matrice Nylon 6 a 33% hmotnostní podíl skelných vláken
- 2) Matrice Nylon 66 a 33% hmotnostní podíl skelných vláken

Oba typy svařil pro přidržovací tlaky 0.8 (nízký tlak) a 4 (vysoký tlak) MPa a formuloval následující závěry:

- U obou materiálů byla statická tahová pevnost svaru vyšší při svaření s tlakem 0.8 MPa než s 4 MPa (obr. 5.10).
- Při nízkocyklové únavě vykazují vzorky svařené při nízkém tlaku lepší pevnostní vlastnosti. Rozdíl v napětí při stejném počtu cyklů do porušení v nízkocyklové oblasti je cca. 20 MPa (obr. 5.11).
- Od hranice 10^6 cyklů do porušení začínají životnosti křivky obou typů vzorků (nízký a vysoký tlak) splývat (obr. 5.11).



obr. 5.11 S-N křivka v závislosti na přidržovacím tlaku (převzato z [20])

Votrubec a kol. [21] experimentálně zjišťovali únavovou pevnost vzorků z polypropyleny (PP) a polykarbonátu (PC) svařených metodou LTW. Testovaly se vzorky s různým plněním. PP vzorky byly plněny na 0 %, 20 % a 40 % objemového podílu skelných vláken. PC vzorky byly plněny na 0 %, 15 % a 30 % objemového podílu skelných vláken. Zkouška byla vytvořena pro přeplátovaný spoj zatěžovaný cyklicky smykem pro parametr asymetrie cyklu $R=0.1$. Bylo zjištěno, že únavová pevnost (pro 10^7 cyklů) svarového spoje je přibližně 1/2 statické pevnosti svaru pro všechny kombinace vzorků a není závislá na objemovém podílu vláken. Zároveň dosahuje pouze 1/4 statické pevnosti materiálu PP a 1/20 statické pevnosti PC. Stejný poměr mezi statickou a únavovou pevností svaru vyplývá i z obr. 5.11 pro vzorky s vysokým tlakem. U vzorků s nízkým tlakem je poměr přibližně 1/3.

5.6.1 Shrnutí kapitoly

- Velikost přidržovacího tlaku ovlivňuje rozměry svaru a orientaci vláken ve svaru.
- Velikost přidržovacího tlaku v určitém intervalu nemá vliv na statickou pevnost svaru. Mimo interval má tlak negativní vliv na pevnost. Interval je různý pro svařovací metodu, materiál a geometrii vzorku.
- Statická pevnost svarů je nižší než statická pevnost základního materiálu
- S vyšším přidržovacím tlakem má svar horší vlastnosti v oblasti nízkocyklové únavy.
- V oblasti vysokocyklové únavy je vliv přidržovacího tlaku nevýznamný.
- Únavová pevnost svaru (10^7 cyklů) je přibližně 1/2 statické pevnosti svaru
- Únavová pevnost svaru kompozitu nezávisí na objemovém podílu vláken.

5.6.2 Poznámka k rešerši týkající se vlivu přidržovacího tlaku na pevnost svaru

Je nutné zdůraznit, že všechny výše uvedené studie se zabývaly pouze vlivem přidržovacího tlaku a ne vlivem lisovacího přesahu. Také se vždy jednalo pouze o přeplátovaný spoj nebo T-spoj. Všechny analýzy byly provedeny na jednoduchých vzorcích a neprovádělo se experimentální testování reálné součásti. Dále nebyla vytvořena žádná MKP analýza zabývající se pevností svarového spoje.

5.6.3 Poznámka k únavě svarových spojů

V rámci této práce je experimentálně a výpočtově řešena pouze statická pevnost svarového spoje. Nejčastěji jsou ale komponenty v automobilovém průmyslu zatěžovány časově proměnným zatížením (únavu) nebo vysokoteplotním *creepem*. Z důvodu časové a finanční náročnosti zkoušek se často jako první odhad životnostních charakteristik používá odhad na základě statických charakteristik. U kovů existuje několik způsobů, jak odhadnout například mez únavy (tab. 5.1).

tab. 5.1 Odhady meze únavy kovů [22]

Vyhodnocovaná veličina	Vztah pro mez únavy při $R=-1$ (pravděpodobnost poruchy $P=50\%$) [MPa]	Koeficienty a podmínky platnosti	Autor
mez pevnosti R_m [MPa]	$\sigma_{-1}=0,432 \cdot R_m+2,2$	konstrukční oceli	Buch
	$\sigma_{-1}=0,46 \cdot R_m$	oceli do $R_m=1400$ MPa	Žukov
	$\sigma_{-1}=\frac{1}{6} R_m+400$	oceli do $R_m=1200$ až 1800 MPa	Ponomarjev
	$\tau_{-1}=0,27 \cdot R_m$	oceli $R_m \leq 1200$	Žukov
	$\tau_{-1}=0,249 \cdot R_m+2,5$	konstrukční oceli	Buch

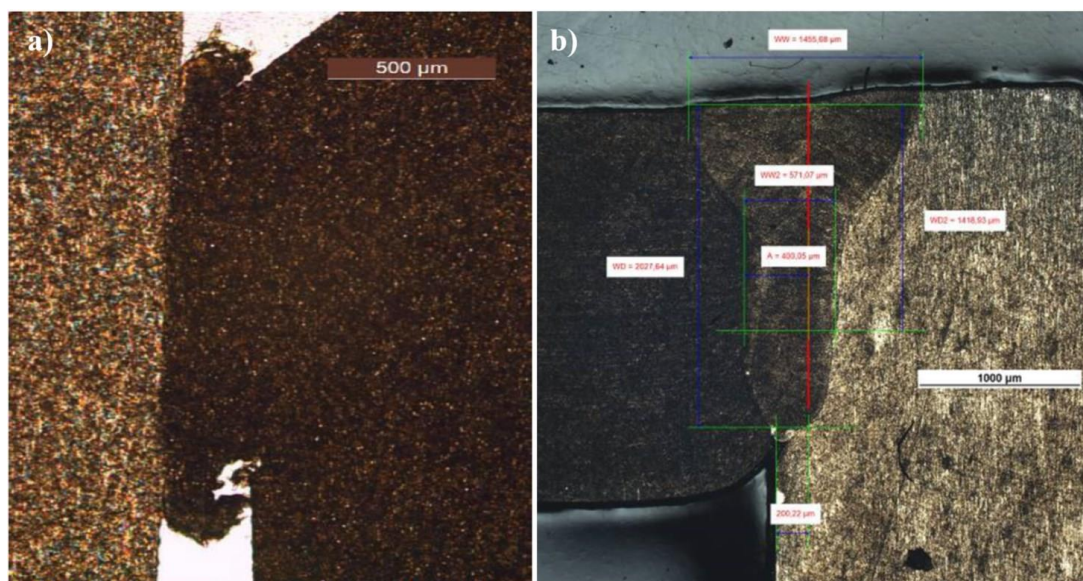
Podobné empirické vztahy v dostupné literatuře pro svary nekovových materiálů neexistují. Stejně je to s informacemi, které se týkají zatížení vysokoteplotním *creepem*.

5.7 Přístupy k hodnocení pevnosti svařovaných nekovových součástí

V současné době neexistují standardizované přístupy k hodnocení pevnosti svarů nekovových součástí. Metody, které existují, jsou vytvořeny pro kovové materiály, konkrétně pro oceli a hliníkové slitiny. Tato kapitola popisuje podstatné rozdíly mezi svařováním kovů a kompozitů. Zároveň je zde vytvořeno shrnutí dostupných metod pro svařování kovů a diskuze nad možnostmi aplikace některých z nich na řešenou problematiku.

5.7.1 Rozdíly mezi laserovým svařováním kovů a nekovových materiálů

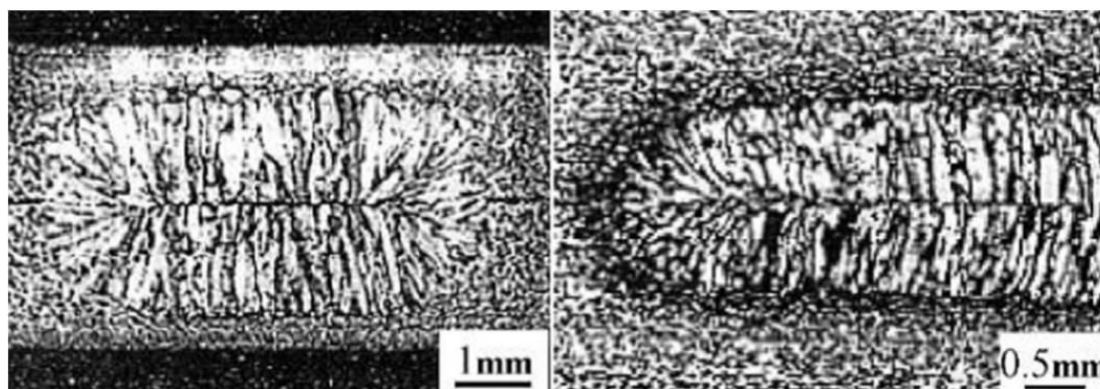
Svarové spoje kovových a nekovových materiálů se podstatně liší. Hlavní rozdíl je v mikrostruktuře svarové oblasti (obr. 5.12). Svarový spoj kovových materiálů má na rozdíl od svaru vytvořeného LTW jasně rozpoznatelné změny struktury materiálu a charakteristické oblasti při nižším nebo stejném zvětšení. Dále se nabízí analogie s odporovým svařováním kovů, každopádně i typická struktura tohoto svaru je diametrálně odlišná viz obr. 5.13.



obr. 5.12 Rozdílná struktura svarového spoje nekovových a kovových materiálů

a) nekovy: metoda LTW, materiál – PPA 40 % obj. podíl skelných vláken; zvětšení 50x

b) kovy: metoda laserového svařování, materiál – ocel 1.4301; zvětšení 25x



obr. 5.13 Typická struktura svaru vzniklého odporovým svařováním [23]

vlevo – titanová slitina; vpravo – slitina mědi

5.7.2 Rozdělení přístupů k hodnocení svarových spojů kovů

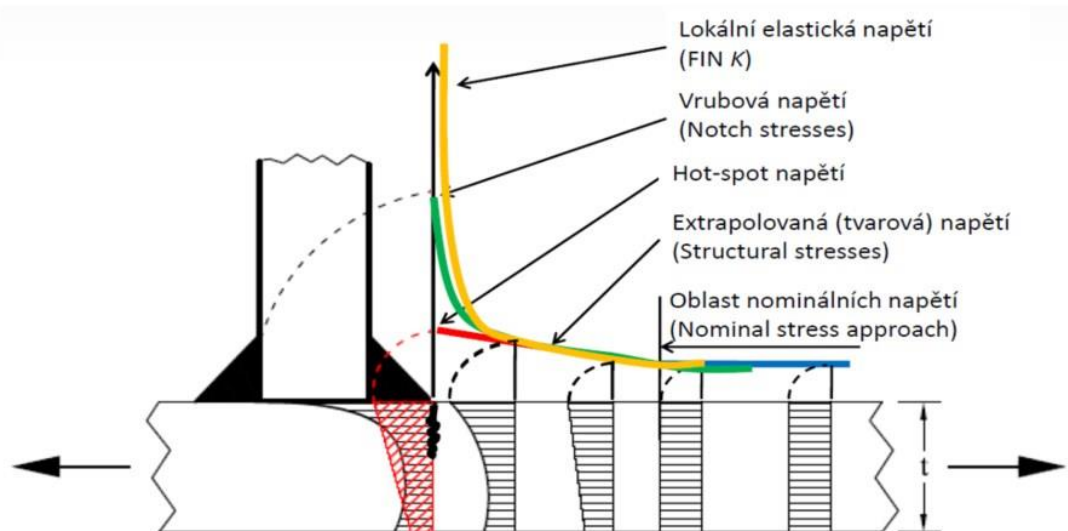
Svarové spoje nelze hodnotit stejným způsobem jako zbylé části konstrukce. Je to z důvodu vlivů popsaných v *kap. 5.3*. Většina metod hodnotí svar jako celek pomocí různých dílčích součinitelů. Základní rozdělení metod je vytvořeno podle [24]:

1) Způsob zatěžování

- Statické zatěžování – počet cyklů při zatížení svarových spojů nepřesáhne během předpokládané doby života hodnotu $5 \cdot 10^3$ (vyplývá z [24]).
- Cyklické zatěžování – počet cyklů přesáhne hodnotu $5 \cdot 10^3$. Tato skupina je dále rozdělena na časovou únavu a únavu. Hranice mezi nimi je $2 \cdot 10^6$ cyklů.

2) Způsob posouzení dané součásti (obr. 5.14)

- Nominální napětí (nominal stress) – napětí v základním materiálu neovlivněné přítomností svaru. Mělo by dosahovat nižších hodnot než přípustné napětí (určeno z příslušných norem). Přípustné napětí zahrnuje vlivy geometrie, zatížení, svaru apod.
- Tvarová napětí (structural stress) – zahrnuje strukturní detail svaru, ale vylučuje vliv koncentrace napětí od paty svaru.
- Vrubové napětí (notch stress) – napětí uvažující i vliv koncentrace napětí v patě a v kořeni svaru.
- Lomová mechanika (fracture mechanics) – vyhodnocení na základě součinitele intenzity napětí (FIN K). Mezní hodnotou je nejčastěji kritická délka trhliny. Metoda posuzuje odolnost proti šíření únavových trhlin na základě růstových zákonů.



obr. 5.14 Napěťové přístupy posouzení svaru [25]

Aplikování napěťových přístupů lze rozdělit podle použité metodiky ([24][25]):

1) Národní standardy

- ČSN – ČSN 05 0120, ČSN 73 1401 a ČSN EN 1993-1
- Eurocode 3
- AWS – AWS D1.1 a AISC

2) Doporučení

- FKM
- DNV – Norské doporučení zaměřené na přímořské konstrukce.
- IIW

3) Speciální metodiky

- Metodika „Volvo“ – Ansys nCode DesignLife
- Metodika Rupp, Störzel a Grubisic
- Metodika Radaj, Seeger, Oliver – Ansys ncode DesignLife nebo Ansys Fatigue
- FEMFAT

4) Posouzení na základě vlastních únavových křivek

Z analýzy výše uvedených přístupů a zdrojů [24][25][26] vyplynulo, že aplikovatelnou metodikou je doporučení od IIW přes přístup tvarových napětí. Metodika IIW bude dále podrobněji popsána. Důvody neaplikovatelnosti ostatních metodik jsou:

- Nelze zahrnout vliv přesahu do výpočtového modelu
- Zahrnutí dílčích součinitelů pro svarové spoje kovů
- Nelze hodnotit na základě nominálních napětí (dílní součinitele určené pro kovy)
- Nekonzervativní přístupy z hlediska hodnocení svarových spojů
- Analytické přístupy (pro typizované svarové detaily – koutový apod.)

5.8 Metodika IIW

Záměr doporučení od IIW (The International Institute of Welding) je poskytnout základy pro návrh a analýzu svařovaných komponent zatěžovaných cyklicky tak, aby se zabránilo únavovému porušení. Kapitola byla vytvořena na základě [26].

5.8.1 Rozsah použití

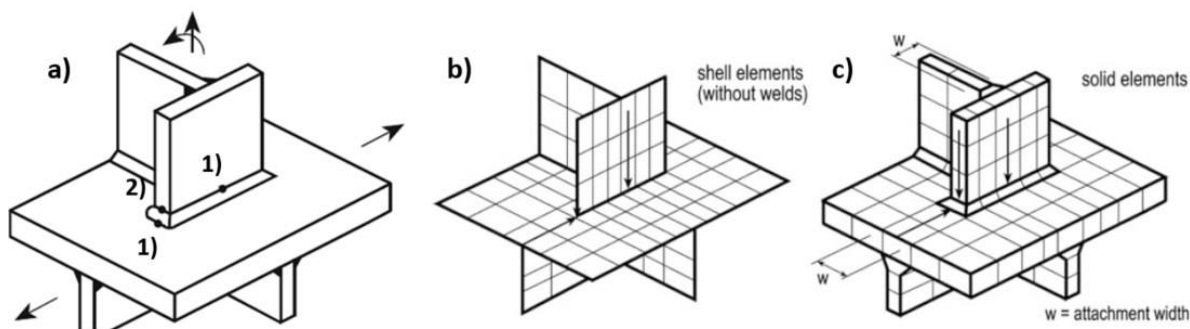
Svařované konstrukce z válcovaných nebo tažených polotovarů z feriticko-perlitické nebo bainitické oceli s maximální mezí kluzu $R_e = 960$ MPa a austenitických korozivzdorných ocelí a slitin Al. Nelze je použít v oblasti nízkocyklové únavy a v případě působení korozního prostředí nebo vysokoteplotního *creepu*. [25]

5.8.2 IIW – Tvarová (extrapolovaná) napětí

Přístup je založen na MKP výpočtu nebo tenzometrickém měření. Tvarová napětí jsou obecně určena pro desky, skořepiny a rotační součásti. Používají se zejména tam, kde nelze jednoznačně určit nominální napětí. Tvarová napětí v sobě zahrnují veškeré vlivy

konstrukčních detailů na napjatost. Princip spočívá v extrapolaci napětí, které vzniká v důsledku změny geometrie (svar). Tím se eliminuje vliv geometrické singularity ve svaru. Základní dělení je podle polohy napětí na povrchu součásti a orientace vzhledem k patě svaru. Pata svaru je na ploše součásti (*obr. 5.15a - 1*) nebo na hraně součásti (*obr. 5.15a - 2*).

Pokud se napětí určuje výpočtovým modelováním, je možné použít skořepinové (*obr. 5.15b*) nebo objemové (*obr. 5.15c*) prvky. U skořepinových prvků se nemodeluje svarový spoj. Naopak u objemových prvků se svar modeluje, ale na nízké rozlišovací úrovni.



obr. 5.15 Tvarová napětí – rozdělení (převzato z [26])

a) dělení dle polohy napětí b) modelování skořepinou c) modelování objemem

Pro výpočet tvarových napětí je nejprve nutné určit referenční body, z nichž se extrapoluje napětí. Referenční body mohou být dva (lineární extrapolace) nebo tři (kvadratická extrapolace). Záleží na použité metodě. Tvarové napětí se tedy dělí podle typu určení referenčních bodů:

- **Typ a)** – jemná síť (závislá na tloušťce tělesa t) a dva nebo tři referenční body (vzdálenosti od paty svaru jsou na *obr. 5.16a*). Tvarové napětí se vypočítá z rovnice (5.1) – 2 body - nebo (5.2) – 3 body.

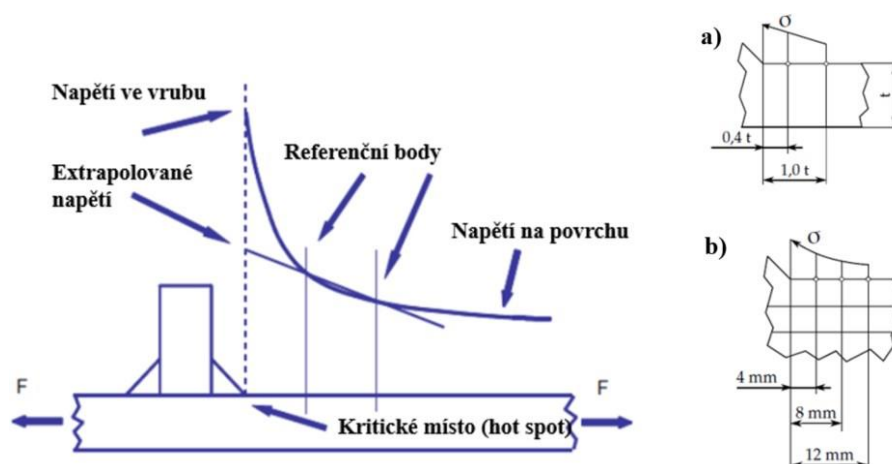
$$\sigma_{ex} = 1.67 \cdot \sigma_{0.4t} - 0.67 \cdot \sigma_{1.0t} \quad (5.1)$$

$$\sigma_{ex} = 2.52 \cdot \sigma_{0.4t} - 2.24 \cdot \sigma_{0.9t} + 0.72 \cdot \sigma_{1.4t} \quad (5.2)$$

- **Typ b)** – jemná síť (nezávislá na tloušťce tělesa) a tři referenční body definované absolutní vzdáleností od paty svaru (*obr. 5.16b*). Extrapolované napětí se vypočítá z rovnice (5.3).

$$\sigma_{ex} = 3 \cdot \sigma_{4mm} - 3 \cdot \sigma_{8mm} + \sigma_{12mm} \quad (5.3)$$

Tvarové napětí se následně porovná s únavovými křivkami z [26].



obr. 5.16 Určení referenčních bodů (převzato z [26])

5.8.3 Shrnutí

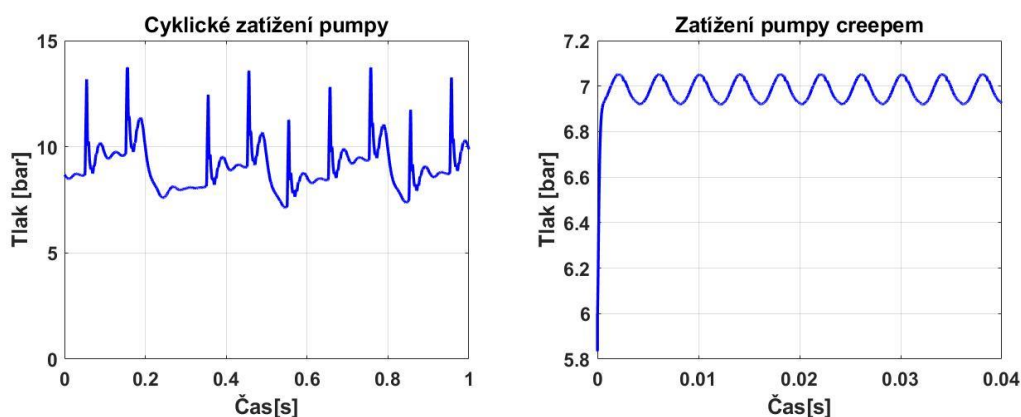
Metoda tvarových napětí byla vytvořena primárně pro oceli a hliníkové slitiny při cyklickém zatěžování. V případě, že se vyhodnocené tvarové napětí neporovná s únavovou křivkou kovů, je možné metodu použít pro jakýkoliv materiál. Jedná se totiž pouze o extrapolaci napětí ve vrubu. Hlavní důvody výběru této metody jsou:

- V rámci rešerše se nepodařilo dohledat přístup pro hodnocení pevnosti svarových spojů nekovových materiálů
- Přístup umožňuje zahrnout geometrické úchytky (velikost přesahu)
- Je možné využít výpočtové modelování
- Svar není detailně modelován (jednoduchá metoda)

6 ANALÝZA PROBLÉMU

Reálná aplikace svarových spojů vytvořených metodou LTW je zejména u palivových pump apod. Hlavní funkcí svarového spoje je v těchto komponentách utěsnění konstrukce proti úniku média. Sekundární funkcí jsou pevnostní vlastnosti spoje.

Pro tyto výrobky je typické cyklické zatížení (*obr. 6.1 vlevo*) nebo zatížení *creepem* (parametr asymetrie cyklu $R \approx 1$ – viz *obr. 6.1 vpravo*). Důvody jsou nasávání a odsávání média, zamrzání média apod.



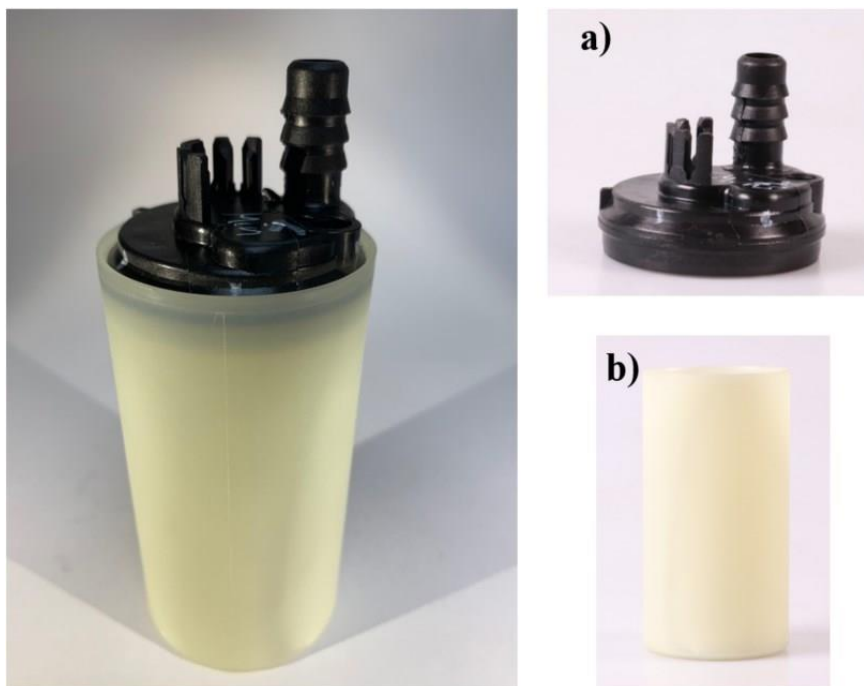
obr. 6.1 Typické zatížení pump v automobilu

Z výše uvedeného je patrné, že za reálného provozu jsou svarové spoje zatěžovány cyklicky a *creepem*. Přesto je hlavním cílem určit statické vlastnosti svarového spoje a to z následujících důvodů:

- Problém vzniknul na základě vzniku mezního stavu trhliny a lomu při lisování
- Výsledky ze statické analýzy budou vstupem do případné životnostní analýzy
- Časové a finanční důvody

6.1 Popis soustavy, na které je problém řešen

Pro experimentální modelování bylo vybráno zkušební tělísko, na kterém se dříve ladily procesní parametry metody LTW. Zkušební tělísko je na *obr. 6.2*. Skládá se ze dvou dílů: z víka (*obr. 6.2a*) a tubusu (*obr. 6.2b*).



*obr. 6.2 Zkušební tělísko a jeho dekompozice
vlevo – svařené; vpravo: a) Víko b) Tubus*

Poznámka k výběru zkušebního tělíska:

Od počátku výběru bylo poukazováno na následující nedostatky vybraného tělíska:

- Není rotačně symetrické – nehomogenní tuhost
- Tvarové prvky způsobí koncentraci napětí a mnohosměrnost skelných vláken po vstříku
- Dělicí rovina je v blízkosti svarové oblasti

Přesto bylo toto tělísko použito, zejména z důvodu již vytvořených vstřikovacích forem, naladěného svařovacího procesu apod. Další výhodou tohoto tělíska byla přítomnost ventilu, která umožňovala provádět zkoušku těsnosti.

6.2 Postup řešení problému

Postup řešení problému je znázorněn na *obr. 6.3*.



obr. 6.3 Postup řešení problému

rámcečky: červená – základní procesy; modrá – podpurná měření, analýzy a vyhodnocení; zelená – výstupy diplomové práce.

7 SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN

V této kapitole je vytvořen systém podstatných veličin z hlediska řešeného problému. Struktura systému je vytvořena na základě [27]. Z *kap. 2.2* vyplývá, že řešený problém je rozdělený na dva subproblémy: **experimentální modelování** a **výpočtové modelování**.

Přestože jsou oba subproblémy propojené, je vytvořen systém podstatných veličin pro každý zvlášť. Dále je důležité podotknout, že jednotlivé subproblémy se skládají z posloupnosti procesů zobrazených na *obr. 6.3* (vstřikování, lisování, svařování, vytlačování a tlakové destrukční zkoušky – dále jen TDZ). Tyto procesy mají odlišné podstatné veličiny. Objekt, na kterém je vytvořen systém podstatných veličin, je popsán v *kap. 6.1*.

Systém podstatných veličin se podle [27] skládá z devíti podmnožin:

- S0 – okolí objektu
- S1 – komplexní popis objektu: struktura, topologie, topografie geometrie
- S2 – vazby objektu s okolím a na nich probíhající interakce
- S3 – aktivační veličiny, tzn. podněty a příčiny
- S4 – ovlivňující veličiny
- S5 – vlastnosti objektu (geometrické, strukturní, fyzikální apod.)
- S6 – procesní a stavové veličiny
- S7 – veličiny vyjadřující projevy objektu
- S8 – popisuje důsledky projevů objektu na okolí nebo na objekt samotný

Veličiny mohou mít následující charakter:

- 1) Charakter popisu: Lingvistický (**L**)/Numerický (**N**)
- 2) Charakter náhodnosti: Deterministický (**D**)/Stochastický (**S**)
- 3) Charakter časové závislosti: Statický (**S**)/Dynamický (**D**)

Každá veličina má kódový popis, aby bylo jasné, jak je v řešení problému uvažována. Struktura kódu je následující: (charakter popisu, charakter náhodnosti, charakter časové závislosti). Například pro numerickou, deterministickou a statickou veličinu je kód (**NDS**).

7.1 Systém podstatných veličin pro experimentální modelování

Procesy vstřikování a svařování byly pro zkušební tělísko odladěny dříve a v rámci experimentálního modelování je nebylo možné ovlivnit. V systému (tab. 7.1) proto nejsou uvažovány.

tab. 7.1 Systém podstatných veličin pro experimentální modelování

S0	Lisování	Lisovací přípravek	LDS
	Vytlačování	Vytlačovací přípravek	LDS
	TDZ	Komora stroje Berstdruck, tlaková hadice, voda v tělese, přípravek pro zkoušku	LDS
S1	Lisování	Výkresová dokumentace a rozměry vstřikovací formy	NDS
	Vytlačování		
	TDZ		
S2	Lisování	Vazba přípravek - díly objektu (víko, tubus), třecí kontakt mezi tubusem a víkem	LDS
	Vytlačování	Vazba přípravek - díly objektu (víko, tubus)	LDS
	TDZ	Spoj hadice a víko, kontakt tubus - přípravek, interakce vody a vnitřní části objektu	LDS
S3	Lisování	Deformační posuv vyvolaný příčnickem stroje	NDS
	Vytlačování	Deformační posuv vyvolaný příčnickem stroje	NDS
	TDZ	Tlak vody	NDD
S4	Prázdná množina		
S5	Lisování	Velikost přesahu, orientace skelných vláken, mechanické vlastnosti materiálu	NDS
	Vytlačování		
	TDZ		
S6	Prázdná množina – problém je řešen na makroúrovni		
S7	Lisování	Deformace tubusu	NSS
	Vytlačování	Deformace v místě svarové oblasti	NSS
	TDZ	Deformace víka a tubusu	LSS
S8	Lisování	Mezní stavy pružnosti a lomu tubusu	NSS
	Vytlačování	Mezní stav lomu svarového spoje nebo základního materiálu	NSS
	TDZ	Mezní stav lomu a trhliny víka, tubusu, svaru nebo tlakové hadice	NSD

7.2 Systém podstatných veličin pro výpočtové modelování

Procesy vstřikování, svařování a tlakové destrukční zkoušky nejsou součástí výpočtového modelu. Vstřikovací proces je modelován moldflow analýzou. Analýza je vytvořena na základě výrobního vstřikovacího procesu a je pouze vstupní informací o orientaci vláken v objektu. Proto v systému (tab. 7.2) není uvažována. Vytvoření výpočtového modelu procesu svařování není cílem této práce. Zároveň to není možné z časových a softwarových důvodů. Tlaková destrukční zkouška má za cíl zjistit těsníci vlastnosti svaru, resp. pevnost při vnitřním přetlaku (pouze experiment). V předkládané práci je tedy vytvořen pouze výpočtový model propojující lisování a vytlačování.

tab. 7.2 Systém podstatných veličin pro výpočtové modelování

S0	Lisování	Okolí je modelováno silovými a deformačními podmínkami – prázdná množina	
	Vytlačování	Vytlačovací přípravek	LDS
S1	Lisování	Výkresová dokumentace a změřené rozměry vystříknutých dílů	NDS
	Vytlačování		
S2	Lisování	Tření mezi víkem a tubusem	NDS
	Vytlačování	Tření mezi přípravkem a objektem	NDS
S3	Lisování	Deformační posuv tubusu, podepření víka, změna teploty	NDS
	Vytlačování	Deformační posuv přípravku, podepření přípravku	NDS
S4	Prázdná množina		
S5	Lisování	Ortotropní model materiálu (charakteristiky od výrobce), zahrnutí nehomogenity	NDS
	Vytlačování		
S6	Prázdná množina – problém je řešen na makroúrovni		
S7	Lisování	Deformace tubusu, kontaktní tlak mezi víkem a tubusem	NDS
	Vytlačování	Deformace objektu	NDS
S8	Analýza důsledků je cílem experimentálního modelování ne výpočtového – prázdná množina		

7.3 Ostatní podstatné jevy a skutečnosti

V této kapitole je shrnutí jevů a skutečností, které nejsou v experimentu a zejména ve výpočtovém modelu uvažovány, ale je důležité si uvědomit, že se zde vyskytují. Jedná se o:

- Zbytková napětí vzniklá vstřikováním a svařováním
- Tepelné ovlivnění svařováním, tzn. i fázové změny (krystalizace apod.)
- Rozdílná struktura svarového spoje oproti základnímu materiálu – deformace vláken
- Ztráta materiálu vlivem svařování (**částečně zahrnuto ve výpočtovém modelu**)
- Aplikace stochastického charakteru veličin na výpočtové modelování
- Plastické a viskoelastické chování materiálu

Jevy a skutečnosti, které dosud nebyly zmíněny, jsou popsány v dalším textu. Zároveň je vysvětlena jejich nepodstatnost z hlediska řešeného problému nebo nemožnost jejich zahrnutí.

8 VÝBĚR METODY PRO ŘEŠENÍ PROBLÉMU

8.1 Metoda řešení

Pro řešení problému formulovaného v *kap. 2.2* je třeba jak experimentálního, tak výpočtového modelování. Na základě rešerše a dostupného vybavení byly vybrány níže popsané metody řešení.

8.1.1 Metoda řešení - experimentální modelování

Jelikož neexistují normativní dokumenty a doporučení pro svarové spoje vyhotovené metodou LTW a pro obecný tvar zkušebního tělíska, bylo třeba vytvořit vlastní testovací metodu. Detailní popis metody je v *kap.9, 10 a 11*.

8.1.2 Metoda řešení - výpočtové modelování

Pomocí výpočtového modelování se modeluje proces lisování a vytlačování. U obou procesů se jedná o statickou úlohu. Vybrána byla metoda konečných prvků (variační přístup) v softwarovém prostředí Ansys Workbench. Důvodem byla softwarová dostupnost, uživatelská znalost metody i softwaru a progresivnost metody.

Poznámka: Je-li odkazováno v dalším textu na Ansys, je tím myšlen právě Ansys Workbench.

8.1.3 Statistické metody

Pro statistické zpracování experimentálních dat byly vybrány jednorozměrná statistická analýza náhodné proměnné a citlivostní analýza. V práci bylo provedeno několik měření a experimentů. Všechny vzorky byly vybrány „náhodně“ (pseudonáhodný výběr v Matlabu – funkce *randi*).

8.2 Použité zařízení a software

V *tab. 8.1* jsou shrnuty veškeré použité softwary. Nejsou uvažovány softwary, které jsou součástí měřicích zařízení. V *tab. 8.2* jsou dále shrnuty všechny použité přístroje a nástroje v rámci řešené problematiky. Detailní popisy a vlastnosti prvků v tabulkách jsou v příloze A.

tab. 8.1 Použitý software

Účel použití	Software
Tvorba výpočtového modelu	Ansys Workbench R1
Tvorba modelu geometrie	Ansys Space Claim R1
Simulace vstřikovacího procesu	Autodesk Moldflow Insight
Statistické zpracování dat	Matlab R2019b, Minitab 19, Optislang 7.5.1

tab. 8.2 Použitá zařízení

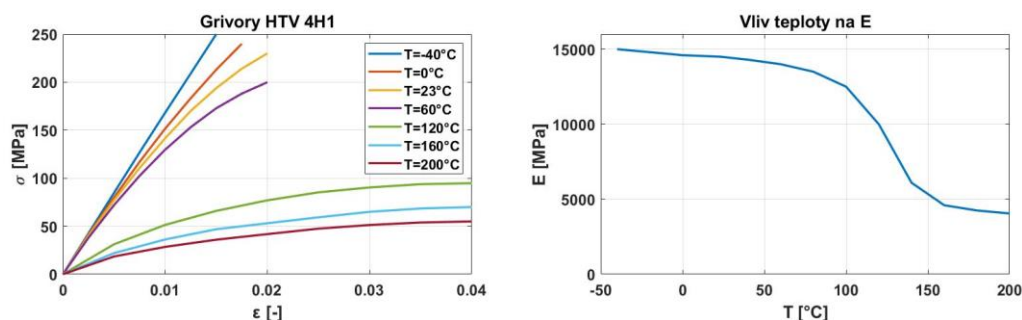
Účel použití	Zařízení
Výroba vzorků	Vstřikolis Engel VC
Lisování a vytlačování	Instron
Tlaková destrukční zkouška	Berstdruck
Příprava vzorků	Pila Proxxon
Měření vzorků	Světlený mikroskop Keyence, Hexagon 3D, Posuvné měřítko
Určení vazby přípravků - objekt	Tlakové fólie
Svařování	Laser Zeltwanger
Hardware	HP Zbook

9 EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ – PŘÍPRAVA VZORKŮ

Nejprve je popsána realizace procesu řešení problému z hlediska experimentálního modelování. Dále je vytvořena prezentace výsledků a jejich analýza. Až poté se práce zaměřuje na výpočtové modelování. Je to z důvodu chronologické návaznosti, jelikož výstupy z experimentu figurují jako vstupy do výpočtového modelu.

9.1 Použitý materiál

Materiál zkušebních těles je *Grivory HTV 4H1⁵ 9205 Black* (Víko) a *Natural* (Tubus). Tento materiál je běžně používán v automobilovém průmyslu. Výrobce garantuje stejné mechanické vlastnosti pro *Black* i *Natural* (barvivo tedy mechanické vlastnosti neovlivňuje). Materiál je plněn skelnými vlákny s objemovým podílem 40% (výrazné zkřehnutí materiálu). Vlastnosti materiálu v závislosti na teplotě jsou na *obr. 9.1 vlevo*. Na *obr. 9.1 vpravo* je vidět změna modulu pružnosti v tahu s rostoucí teplotou.



obr. 9.1 Mechanické vlastnosti materiálu Grivory HTV 4H1 (převzato z [28])

poznámka: vlevo) nasycený stav; vpravo vysušený stav (nasycený stav nebyl uveden)

Vybrané (podstatné) materiálové vlastnosti garantované výrobcem jsou v *tab. 9.1*. V případě polymerů je třeba rozlišovat vysušený stav (*dry*) a stav nasycený (*cond.*) ve smyslu vlhkosti. Granulát materiálu byl před vstřikováním vysušený, každopádně před dalšími procesy vystříknutá tělíska vysušená nebyla. Proto jsou uvedeny pouze charakteristiky pro nasycený stav. Je třeba podotknout, že přesné hodnoty nasycení výrobce neuvádí.

tab. 9.1 Vybrané materiálové charakteristiky materiálu Grivory HTV 4H1

E [MPa]	σ_{PL} [MPa]	ϵ_{PL} [%]	T_m [°C]
14000	210	2	325

Z hlediska podstatných mechanických charakteristik výrobce udává pouze vlastnosti ve směru vláken. Materiál ale v důsledku nahodilého rozmístění skelných vláken při vstřikování vykazuje anizotropní chování. V určitých případech (jednoduchá geometrie tělesa) jsou vlákna

⁵ HTV – high temperature (vysoká teplota), glass-fibre reinforced (vyztužený skelnými vlákny); 4 značí objemový podíl skelných vláken (x10 – tzn. 40%), H – heat stabilised (tepelně stabilizován), 1 značí typ polymerní matrice, v tomto případě je to PA6T/6I.

uspořádána ve směru vstřiku To znamená, že je možné materiál popsat ortotropními charakteristikami. Tato data poskytuje společnost Autodesk a uvádí je v materiálové knihovně softwaru Autodesk Moldflow. Ortotropní charakteristiky jsou uvedeny v *tab. 9.2* (není uvedeno, zdali se jedná o nasycený nebo vysušený stav).

tab. 9.2 Ortotropní materiálová data

E_x [MPa]	E_y [MPa]	E_z [MPa]	G_{xy} [MPa]	G_{xz} [MPa]	G_{yz} [MPa]	μ_{xy} [-]	μ_{xz} [-]	μ_{yz} [-]
5239	14468	5239	2763	1765	2763	0.368	0.484	0.368

Podtržené veličiny byly zadané. Podélný směr vláken je ve směru osy y . Při uvažování stejných mechanických vlastností ve směrech kolmých na vlákna (x a z) lze získat další tři konstanty μ_{yz} , G_{yz} a E_z . Konstanta G_{xz} se vypočítá ze vztahu (9.1). Vztah (9.1) je možné použít, jelikož ve směru x a z je chování materiálu stejné.

$$G_{xz} = \frac{E_x}{2 \cdot (1 + \mu_{xz})} \quad (9.1)$$

9.2 Vstřikování zkušebních těles

Vstřikování bylo provedeno na vstřikolisu Engel VC (viz příloha A). Topologie a geometrie dílčích zkušebních těles (víko, tubus) vyplývají z výrobních výkresů.

9.2.1 Svařovací geometrie

Na úvod je vymezena svařovací geometrie, tzn. rozhraní víka a tubusu, které se po zalisování svařuje. Svařovací geometrie je znázorněna na *obr. 9.2*.

Pro analyzování vlivu přesahu byly vystříknuty tři různé velikosti vík při zachování stejných rozměrů tubusu. U víka byl požadavek zachování stejné výšky svařované oblasti a úhlu α . Proměnné byly dva rozměry:

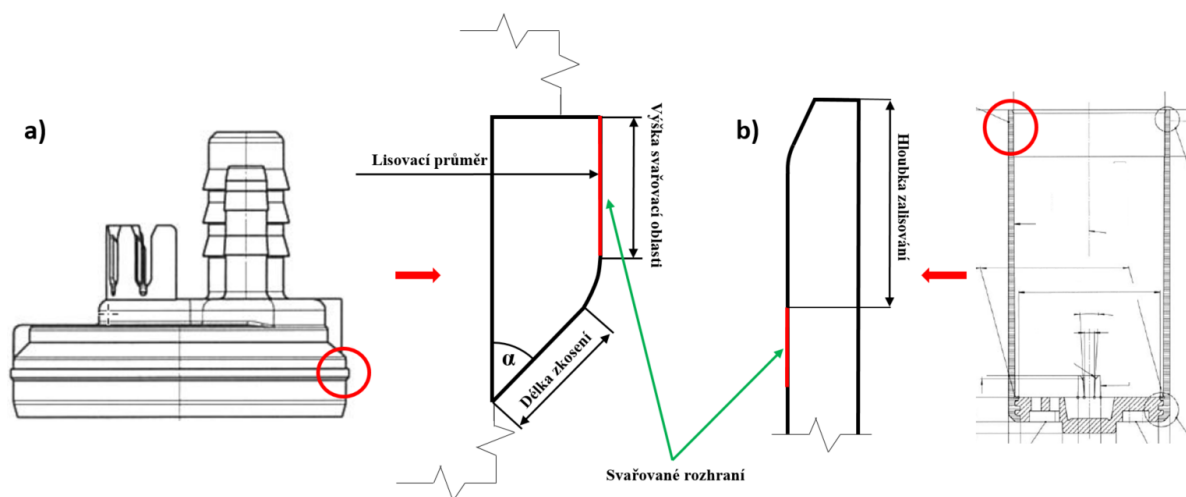
- 1) Lisovací průměr víka (nepřímo určuje přesah)
- 2) Délka zkosení (z důvodu zachování úhlu α) – nepodstatný z hlediska svařování

Víka (poté i celá zkušební tělesa) byla jmenovitě odlišena na základě velikosti svařovacího průměru na Minimal, Nominal a Maximal (dále pouze MIN, NOM, MAX). Velikosti průměrů svařovací geometrie dle výrobních výkresů jsou v *tab. 9.3*.

tab. 9.3 Jmenovité rozměry lisovacího průměru

Typ víka	MIN	NOM	MAX
Vnější průměr víka [mm]	45.6	45.9	46.2

Poznámka: Vystříknuto bylo 70 vzorků pro každý typ víka (tzn. celkem 210 vík a tubusů).



obr. 9.2 Svařovací geometrie

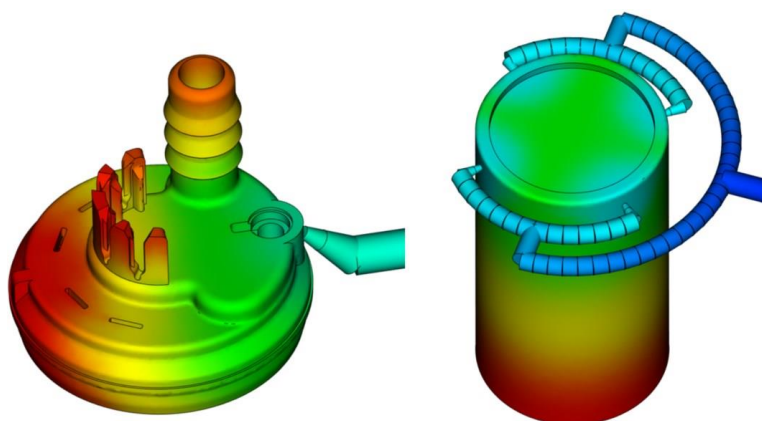
a) víko b) tubus

9.2.2 Nastavení vstřikovacího procesu

Základní parametry vstřikovacího procesu jsou v tab. 9.4. Víko bylo vstřikováno v jednom bodě a tubus ve čtyřech (viz obr. 9.3).

tab. 9.4 Základní parametry vstřikovacího procesu

Díl	t_v [s]	T_{IN} [°C]	Q [cm ³ /s]	p_{IN} [MPa]	t_c [s]
Víko	1.4	160	11.81	70	25
Tubus	1.7	160	20.45	120	25



obr. 9.3 Vstřikovací body pro víko (vlevo) a tubus (vpravo)

poznámka: obrázky jsou z moldflow analýzy; barevná pole zde znázorňují časovou posloupnost plnění.

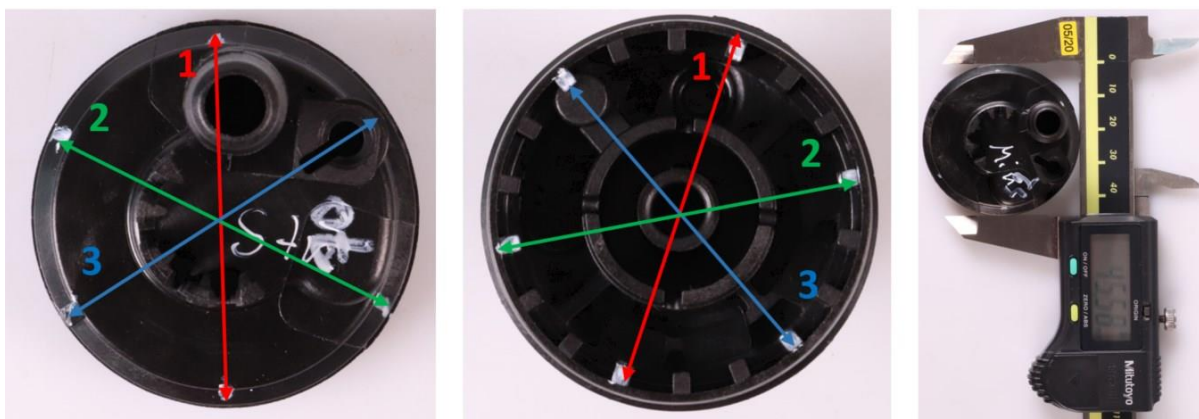
9.2.3 Měření rozměrů

Po vystříknutí bylo důležité zjistit, zdali se podstatné rozměry z hlediska řešeného problému výsledných objektů výrazně neodchylují od výkresové dokumentace. Tyto rozměry rozhodují o velikosti lisovacího přesahu. Jednalo se o:

- Lisovací průměr víka
- Vnitřní průměr tubusu

9.2.3.1 Měření lisovacího průměru víka

Vnější průměr víka bylo možné změřit pomocí posuvného měřítka. Průměr byl měřen na třech místech (*obr. 9.4*). Ta byla stejná pro všechny vzorky. Zajištění totožných měřených míst bylo pomocí tvarových prvků na víku (žebra).



obr. 9.4 Měření lisovacího průměru víka

zleva: měřená místa pohled shora; měřená místa pohled zdola; ukázka měření

Na základě změřených dat byly vypočítány aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Podle normy ISO GUM byly následně vyčísleny rozšířené nejistoty měření při přímém měření. (kompletní postup je v příloze B). Statisticky zpracované změřené hodnoty jsou porovnané s požadovanými rozměry v *tab. 9.5*.

tab. 9.5 Velikost lisovacího průměru víka

Typ víka	Požadovaný vnější průměr [mm]	Změřený vnější průměr [mm]	δ_r středních hodnot [%]
MIN	45.60 ± 0.04	45.55 ± 0.05	0.10
NOM	45.90 ± 0.04	45.85 ± 0.05	0.11
MAX	46.20 ± 0.04	46.15 ± 0.05	0.11

Z tabulky vyplývá, že odchýlení od výrobního výkresu z hlediska relativní chyby středních hodnot je pouze 0.1 %. Odchýlení od střední měřené hodnoty v rámci nejistot měření je pro všechny víka 0.05 mm. Každopádně z hlediska experimentu je podstatné, že rozestup v rámci posloupnosti mezi velikostmi středních hodnot průměrů jednotlivých typů vík je vždy

stejný (0.3 mm). Pro výpočtové modelování jsou pro tvorbu modelu geometrie použity střední hodnoty z měření.

Poznámka ke vstřikování víka: Vstřikovací proces víka je navržen tak, že dělicí rovina je při vstřikování umístěna na horní hranu svařovací geometrie. To způsobí, že po vyhození tělísek (vík) zůstává na svařovací geometrii zbytkový materiál dělicí roviny (dále jen **otřep**). Z počátku byl otřep vyhodnocen jako nepodstatný z hlediska řešeného problému. Přesto byl lisovací průměr měřen pod otřepem. V rámci ladění výpočtového modelu bylo zjištěno, že otřep má významný vliv na rozložení kontaktního tlaku. Vlivem otřepu se tak zabývají až kapitoly zaměřené na výpočtové modelování.

Měření vnitřního průměru tubusu

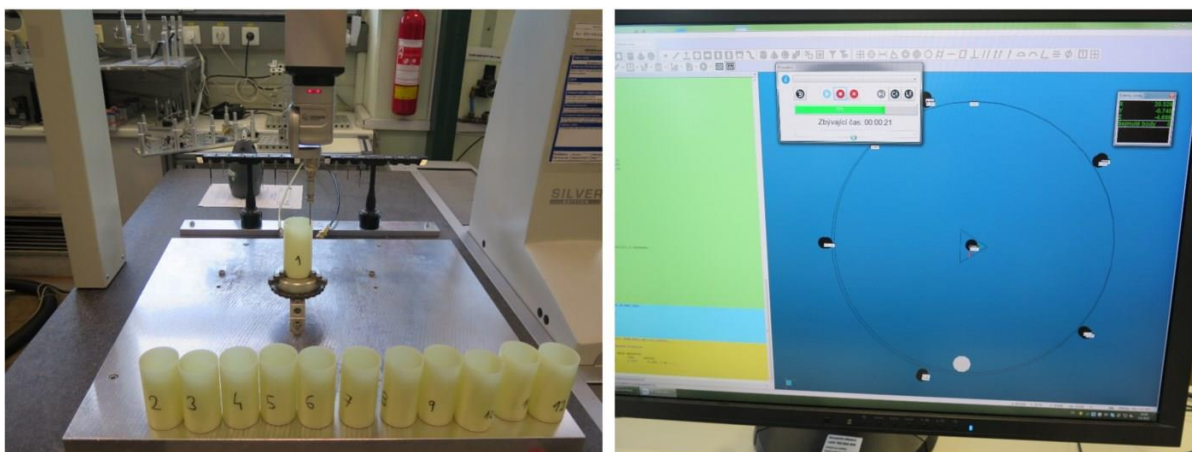
Vnitřní průměr rovné části tubusu bylo třeba změřit na speciálním přístroji Ascen (viz příloha A), z důvodu vysoké poddajnosti tubusu (tenkostěnná válcová skořepina s jedním dnem – měřený průměr byl u bezedné strany). Při držení a měření tubusu totiž docházelo k velkým deformacím (elastickým) a odchylky v měřených hodnotách dosahovaly desítek procent. Zároveň nebylo možné zaručit stejná měřená místa. Měřeno bylo 25 tubusů. Požadovaný rozměr ve výkresové dokumentaci byl 45.5±0.05 mm. Postup měření byl následující:

- 1) Sonda najíždí na vnitřní průměr a tam se „předvyrovná“ v prostoru a vytvoří počátek os x a y
- 2) Sonda vybere body na vnější části tubusu a v 0.5 mm vzdálenosti od těchto bodů začne snímat čelo tubusu
- 3) Z těchto bodů program vytvoří rovinu a na tuto rovinu se díl v prostoru finálně vyrovná.
- 4) Proběhne měření v hloubce 4.7 mm (odhadovaná hloubka zalisování) pod rovinou na vnitřní straně tubusu. Měří se po 5°.
- 5) Z těchto bodů je vytvořena minimální opsaná, maximální vepsaná a střední kružnice. U tří vzorků byla graficky vyhodnocena kruhovitost.

Statisticky zpracované výsledky měření (rozšířená nejistota měření – příloha B) jsou v *tab. 9.6*. Ukázka měření je na *obr. 9.5*. Grafické znázornění kruhovitosti na *obr. 9.6*.

tab. 9.6 Velikost vnitřního průměru tubusu

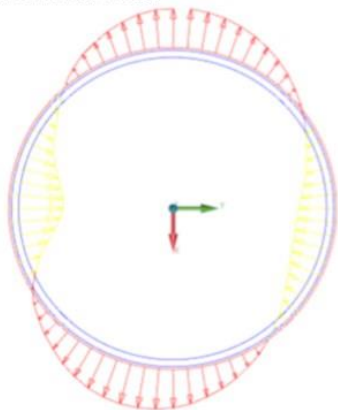
Měřená kružnice	Minimální opsaná	Střední	Maximální vepsaná
Průměr [mm]	45.78±0.17	45.33±0.03	44.91±0.26
δ_r středních hodnot [%]	0.61	0.37	0.9



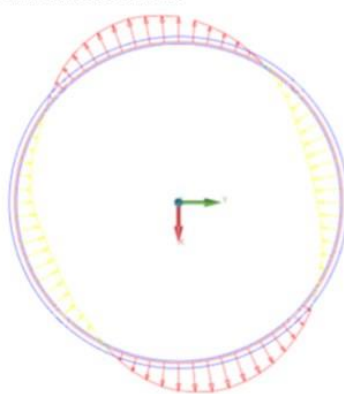
obr. 9.5 Ukázka měření vnitřního průměru rovné části tubusu

vlevo: snímání bodů na vnitřním průměru; vpravo: softwarové zpracování změřených dat

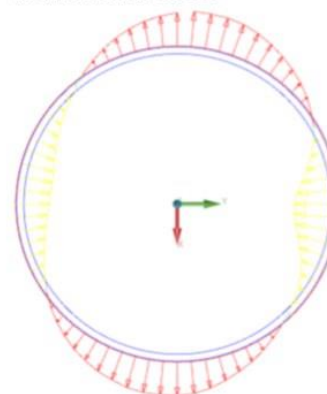
Vzorek 4
Kruhovitost: 0.667



Vzorek 8
Kruhovitost: 0.416



Vzorek 8
Kruhovitost: 0.565



obr. 9.6 Grafické zobrazení kruhovitosti tubusu

červené šipky znázorňují zvětšený rozměr oproti nastavené nominální hodnotě průměru (45.3 mm); měřítko šipek je 20:1, velikost je v mm.

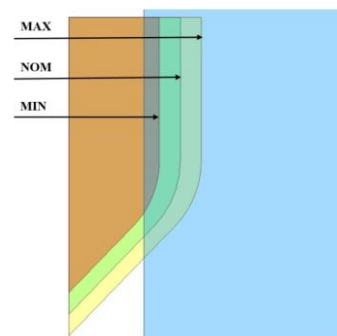
Z tabulky jsou patrné velké rozdíly v měřených hodnotách a velké odchylky v kruhovitosti (až 0.667). Na základě vysoké poddajnosti tubusu byl učiněn předpoklad, že se tubus při lisování přizpůsobí kruhovému tvaru víka a vnitřní průměr bude po obvodu stálý. Jako referenční hodnota pro výpočet přesahu byla vybrána střední kružnice, tzn. 45.33 mm.

Na základě naměřených a zpracovaných hodnot bylo možné určit velikosti přesahu pro jednotlivá víka (tab. 9.7). Přesah byl vypočten jako polovina rozdílu středních hodnot svařovacího průměru víka a vnitřního průměru tubusu (viz 9.2). Rozdílnost v přesahu je schematicky znázorněna na obr. 9.7.

$$\text{Přesah} = \frac{1}{2} (\text{Lisovací průměr víka} - \text{Vnitřní průměr tubusu}) \quad (9.2)$$

tab. 9.7 Lisovací přesah

Víko	MIN	NOM	MAX
Svařovací průměr víka [mm]	45.55	45.85	46.15
Vnitřní průměr tubusu [mm]	45.33	45.33	45.33
Lisovací přesah [mm]	0.11	0.26	0.41

obr. 9.7 Znáznornění přesahů
Tubus (modrá)

9.2.4 Předpoklad o determinismu lisovacího přesahu

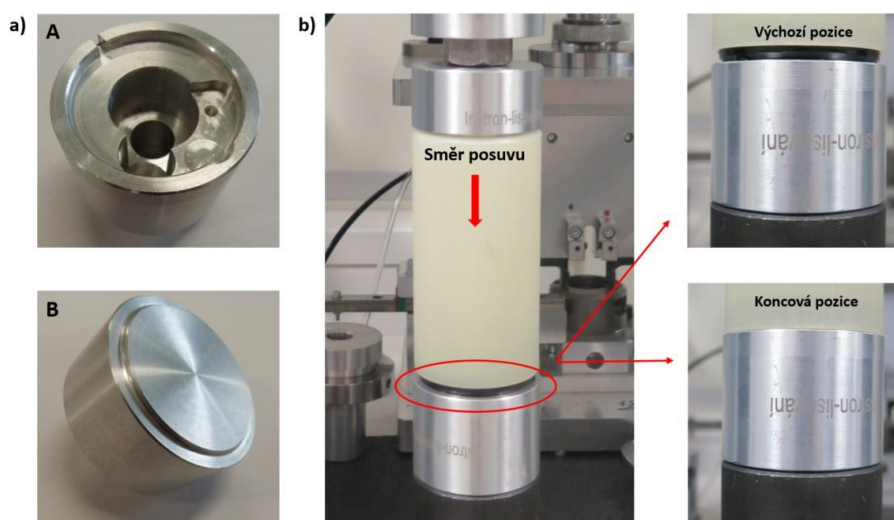
Na základě velmi nízkých hodnot rozšířených nejistot měření u vnitřního průměru tubusu, a také lisovacího průměru víka, byl vytvořen předpoklad, že hodnotu lisovacího přesahu lze považovat jako deterministickou. Z tohoto předpokladu vychází všechny následující analýzy. Z tohoto důvodu nebyla provedena analýza šíření chyb a nejistot měření.

9.3 Lisování

Po vstřikování následoval proces lisování. Použitý byl stroj Instron (viz příloha A).

9.3.1 Nastavení lisovacího procesu

Lisovací přípravek se skládal ze dvou částí **A** a **B** (obr. 9.8a).



obr. 9.8 Lisovací přípravek a proces

a) lisovací přípravek b) lisovací proces – v koncové pozici dochází ke kontaktu tubusu a dílu A

Díl A byl nepohyblivě upevněn ke stroji Instron a sloužil k uložení víka. Jeho vnitřní část byla obrobena tak, aby kopírovala vrchní tvarové prvky víka. Díl B byl upevněn k pohyblivému

rameni stroje a sloužil k zaručení jednosměrného posuvu tubusu při lisování. Tvar dílu **B** kopíruje plné dno tubusu.

Proces lisování je znázorněn na *obr. 9.8b*. Nastavení procesu je v *tab. 9.8*. Nastavení bylo rozdílné pro každý rozměr víka. Lisovalo se na doraz, tzn. dokud tubus nenarazil do dílu **A** lisovacího přípravku. Tento způsob měl zaručit stejnou hloubku zalisování pro všechny díly.

tab. 9.8 Nastavení procesu lisování

Víko	MIN	NOM	MAX
Předběžný test	$v = 10 \text{ mm/min}$ a $F = 0.5 \text{ N}$		
Test	$v = 10 \text{ mm/min}$ a $f_{vz} = 5 \text{ ms}$		
Podmínka 1 – tlakové protažení	3.9 mm	4 mm	4.1 mm
Podmínka 2 – limitní zatížení	400 N	1000 N	1600 N

předběžný test – počátek měření; podmínky 1 a 2 – při dosažení jedné z nich dojde k ukončení testu; podmínky byly nastaveny na prvních třech vzorcích pro každý typ přesahu.

9.3.2 Měření hloubky zalisování

Přestože lisování na doraz mělo zaručit stejnou hloubku zalisování (*obr. 9.2*), bylo nutné zkontrolovat, zdali tomu tak opravdu je. Rozdílná hloubka zalisování by totiž mohla mít vliv na pevnost svaru. Velikost hloubky zalisování byla zároveň jedním ze vstupů do výpočtového modelu. Měření bylo provedeno posuvným měřítkem na jednom místě, které bylo stejné pro všechny díly. Měřený rozměr je na *obr. 9.9*. Hloubka zalisování nebyla měřená přímo, ale byla dopočítána z rozměrů ve výkresové dokumentaci. Hodnoty měřeného rozměru a dopočítané hloubky zalisování jsou v *tab. 9.9*. Vyhodnocení nejistot měření je v příloze B. Měřeno bylo 30 vzorků. Z *tab. 9.9* vyplývá, že lisovací hloubka je totožná pro každý typ víka.



obr. 9.9 Nepřímé měření hloubky zalisování

tab. 9.9 Měřený rozměr po zalisování

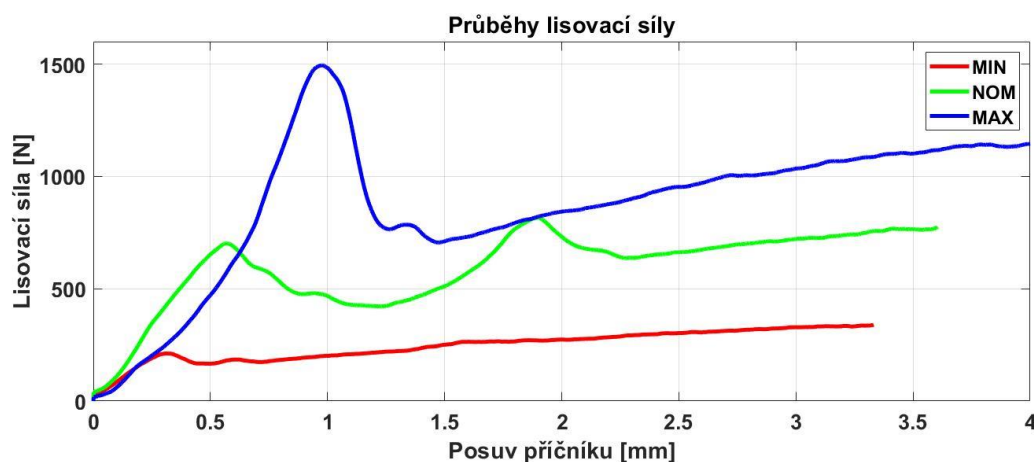
Víko	MIN	NOM	MAX
$l \text{ [mm]}$	95.02 ± 0.07	95.03 ± 0.06	95.02 ± 0.08
$h \text{ [mm]}$	4.7	4.7	4.7

*l – měřený rozměr; h – hloubka zalisování
(zaokrouhlená střední hodnota)*

9.3.3 Výstup z lisování

Výstupem z lisovacího procesu byla závislost síly na dráze (posuvu příčnicku). Přestože by se dráha z posuvu příčnicku vyhodnocovat neměla (vymezení vůlí apod.), nebylo možné při tomto procesu vyhodnocovat pohyb jinak. Síly dosahovaly řádově pouze stovek Newtonů. Proto byl učiněn předpoklad, že případná nepřesnost od vymezení vůlí apod. je nepodstatná.

Závislosti síly na dráze pro jednotlivé vzorky jsou v příloze B. Na *obr. 9.10* je pouze porovnání reprezentativního vzorku každého z vík.



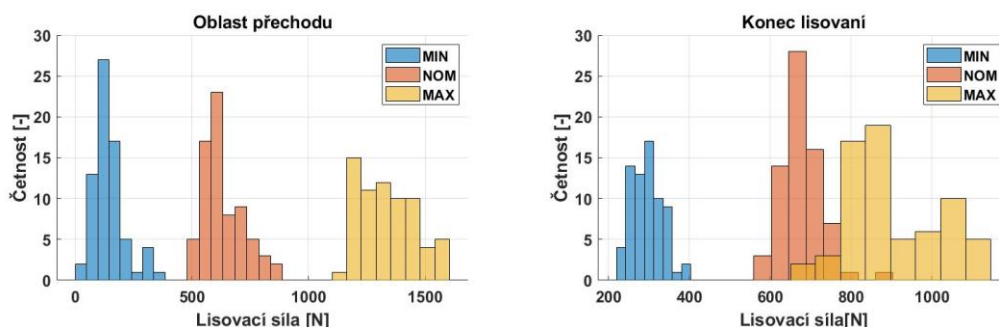
obr. 9.10 Výstupy z lisování – reprezentativní případy

9.3.4 Analýza lisovacího procesu

Z *obr. 9.10* je patrné, že závislost lisovací síly na posuvu příčnicku je u všech typů vík MIN, NOM, MAX analogická. Prvně dojde k rychlému nárůstu síly. To způsobí tvarový přechod mezi zaobleními obou dílů. Poté dojde k poklesu síly, jelikož se vůči sobě začínají relativně pohybovat pouze rovné části. V ideálním případě (bez tření) by síla dál klesala. Z důvodu nenulové hodnoty součinitele tření a tendence tubusu vracet se do výchozí konfigurace (tubus je radiálně deformován) dochází po rychlém poklesu opět k nárůstu síly. U vzorků typu **NOM** a některých vzorků typu **MIN** docházelo ještě k dalšímu rychlému nárůstu síly (přibližně při posuvu příčnicku 2.5 mm). Byla formulována hypotéza, že tento jev způsobil právě již zmíněný otřep, který vytvořil další tvarový přechod. Hypotéza byla potvrzena výpočtovým modelováním (viz dále). U většiny vzorků typu **MIN** a všech vzorků typu **MAX** tento jev nebyl pozorován. To lze vysvětlit tak, že z důvodu malého přesahu u **MIN** docházelo ke kontaktu mezi otřepem víka a tubusem až v rovné části. U **MAX** naopak z důvodu velkého přesahu docházelo ke kontaktu mezi otřepem víka a tubusem už ve zkosené části, to znamená v době, kdy byly v kontaktu zaoblení jednotlivých dílů, takže se jev neprojevil.

9.3.5 Statistické zpracování dat z lisování

Jelikož data z lisování jsou vstupem do výpočtového modelu a mají sloužit k jeho validaci, bylo nutné je statisticky zpracovat a výpočtový model validovat na reprezentativním případě. Vyhodnocována byla maximální síla v oblasti přechodu zaoblení a maximální síla na konci testu (*obr. 9.11*).



obr. 9.11 Histogramy maximální lisovací síly

Z obr. 9.11 vyplývá, že velikost maximální lisovací síly v oblasti přechodu a na konci lisování nemá normální rozdělení. Pro potvrzení byl proveden Anderson Darlingův test normality. Výsledky testu lze vyhodnotit na základě tzv. *p-hodnoty*. Je-li *p-hodnota* menší než zvolená hladina významnosti, zamítá se nulová hypotéza. V tomto případě se jedná o zamítnutí normality testovaných dat. Výsledné *p-hodnoty* jsou v tab. 9.10. Při typické hladině významnosti $\alpha=0.05$ lze považovat data za normální pouze u MAX v oblasti přechodu a u MIN a NOM na konci lisování. Proto je vhodnou charakteristikou pro srovnání a validaci výpočtového modelu medián (viz tab. 9.11).

tab. 9.10 Test normality Anderson Darling – výsledné *p-hodnoty*

Víko	MIN	NOM	MAX
<i>p-hodnota (přechod)</i>	< 0.005	< 0.005	0.060
<i>p-hodnota (konec)</i>	0.132	0.087	< 0.005

tab. 9.11 Mediánové hodnoty lisovacích sil použité pro validaci výpočtového modelu

Víko	MIN	NOM	MAX
Lisovací síla – medián (přechod) [N]	130	605	1330
Lisovací síla – medián (konec) [N]	294	680	867

Podrobnější statistické zpracování je nepodstatné. Hodnoty slouží pouze k validaci výpočtového modelu.

9.4 Svařování

Svařování bylo provedeno metodou LTW. Byla použita technika kvazisisimultánního svařování. V tomto případě byl laser v jedné stabilní pozici a zkušební tělísko se otáčelo určitou úhlovou rychlostí. Ke svaření byl použitý laser Zeltwanger (viz příloha A). Proces lze rozdělit na dvě části. První část obsahuje upnutí zalisovaného vzorku do upínacího zařízení. Pro upnutí byl použitý stejný přípravek jako pro lisování. Po upnutí byla aplikována síla 1270 N pro přidržení vzorku. Tato síla byla aplikována po celou dobu svařování (stabilizace vzorku při rotaci). V druhé části se laser vyrovnal do výšky svařovací geometrie. Poté došlo k aktivaci laseru, rotaci vzorku a svaření po celém obvodu.

9.4.1 Nastavení svařovacího procesu

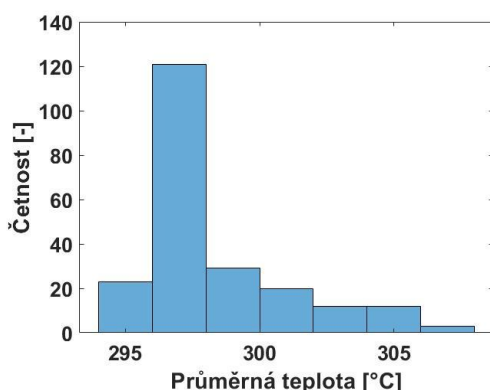
Celkové nastavení svařovacího procesu použitého zkušebního tělíska bylo odladěno už dříve a je nepodstatné z hlediska řešeného problému. Proto jsou uvedeny pouze základní procesní parametry (*tab. 9.12*)

tab. 9.12 Základní procesní parametry LTW

T [°C]	F _h [N]	t _w [s]
295	1270	1.5

9.4.2 Histogram průměrné teploty při svařování

Na *obr. 9.12* je histogram průměrné teploty při svařování pro všechny vzorky. Z obrázku vyplývá, že všechny vzorky lze brát z hlediska stability svařovacího procesu za rovnocenné. Stejně lze rozhodnout i na základě statistických charakteristik průměrné svařovací teploty (viz *tab. 9.13*).



obr. 9.12 Histogram průměrné svařovací teploty

tab. 9.13 Statistické charakteristiky průměrné svařovací teploty

Střední hodnota [°C]	298
Směrodatná odchylka [°C]	2.74
Rozptyl [°C²]	7.5
Variační koeficient [-]	0.009

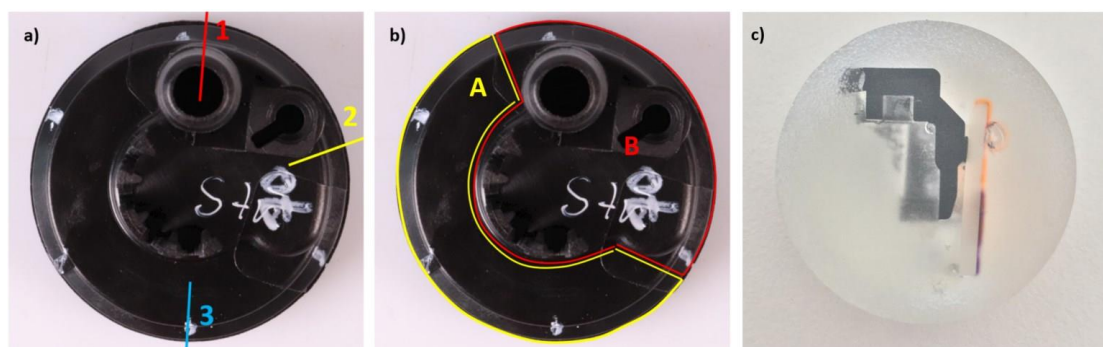
9.4.3 Přeměření hloubky zalisování

Přidržovací síla mohla ovlivnit hloubku zalisování, a proto bylo nutné tento rozměr přeměřit. Princip měření byl stejný jako v *kap. 9.3.2*. Konkrétní hodnoty jsou nepodstatné. Pouze lze konstatovat, že se hloubka zalisování nezměnila.

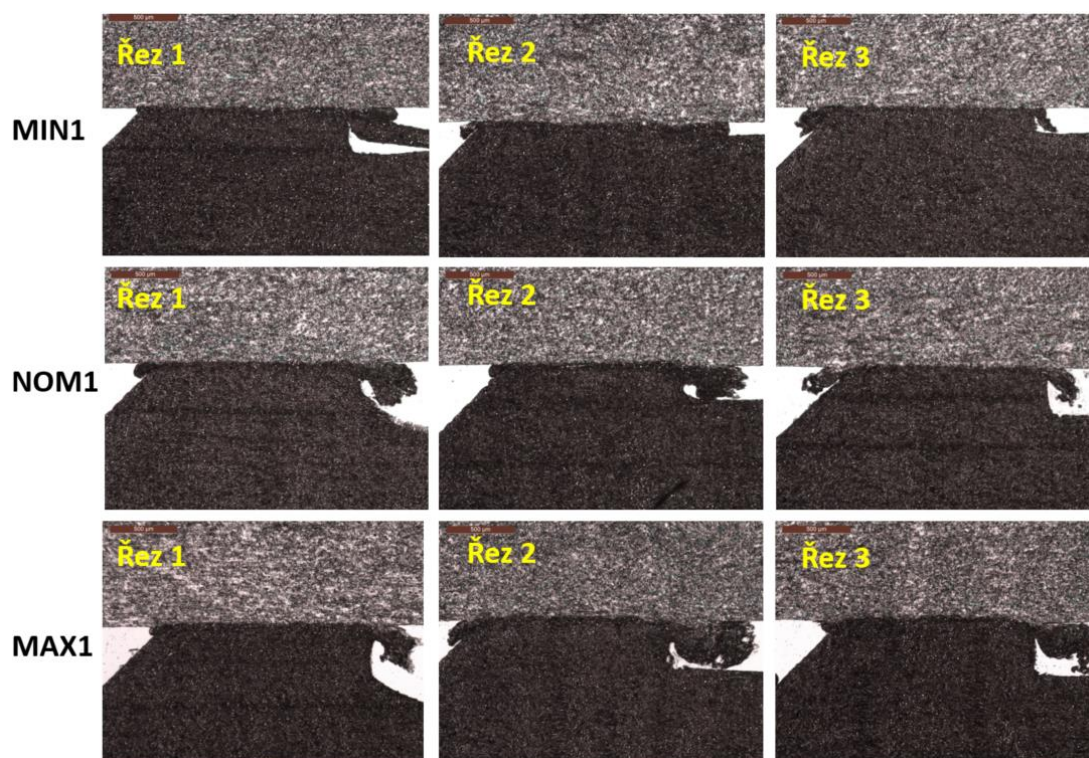
9.4.4 Mikrotomová analýza

K vyhodnocení určitých aspektů kvality svaru, viz *kap. 5.3*, byly vybrané vzorky poslány na mikrotomovou analýzu. Vyhodnocovaly se vady svaru typu dutina, přetok apod. a stabilita svaru po obvodu (výška svaru). Z finančních důvodů byly vyhodnoceny pouze dva vzorky každého typu a na každém vzorku tři řezy (18 řezů celkem). Roviny řezů jsou znázorněny na *obr. 9.13a*. Víko není rotačně symetrické a tvarové prvky na jeho vrchní části způsobují rozdílnou tuhost víka. Víko je proto rozděleno na dvě oblasti: **A** („poddajná“) a **B** („tuhá“) viz *obr. 9.13b*. Na *obr. 9.13c* je ukázka vzorku pro mikrotomovou analýzu.

Řezy pro první vzorek pro každý typ víka jsou na *obr. 9.14*. Řezy pro druhý vzorek jsou v příloze B. Ze snímků lze konstatovat, že svar je bez vad pro každý přesah (vyjma vzorku MIN2 řez 1 viz příloha B).



obr. 9.13 Příprava vzorků pro mikrotomovou analýzu



*obr. 9.14 Mikrotomové řezy
použitý mikroskop – Leica (zvětšení 50x)*

10 STATICKÁ ZKOUŠKA – VYTLAČOVÁNÍ

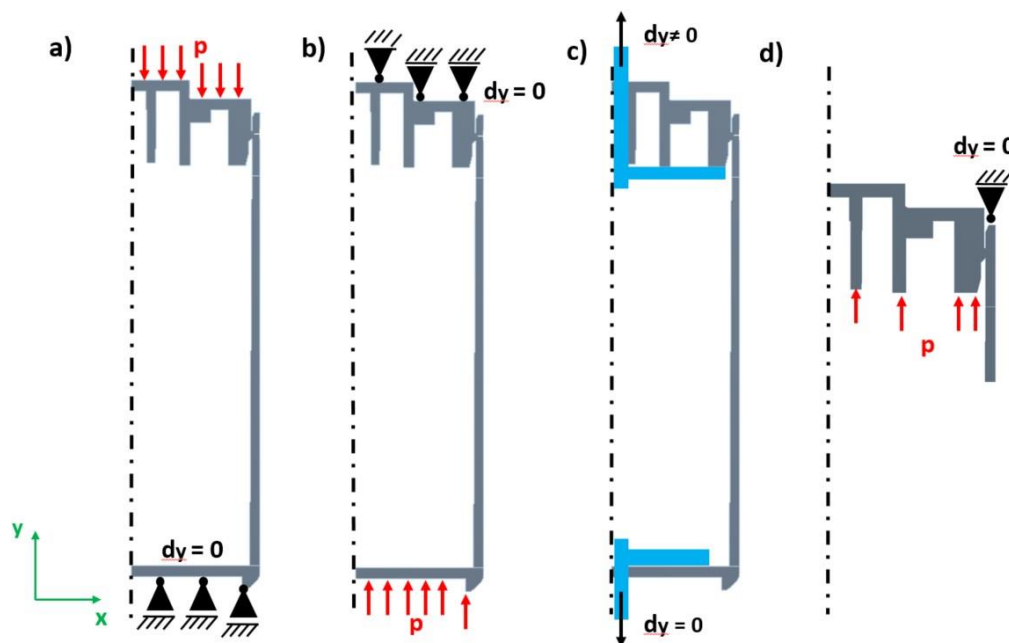
Před samotným testováním pevnosti svaru bylo třeba navrhnout určitou metodu tak, aby došlo k porušení svaru. Proto byla vytvořena množina způsobů, jak svar otestovat. Pro každý způsob byl vytvořen výpočtový model v Ansysu. Analyzovalo se rozložení napětí. Na základě analýzy byla vybrána optimální metoda.

10.1 Realizace procesu řešení

10.1.1 Simulace zkoušky

Navrženy byly čtyři metody statické zkoušky:

- Protlačování víka do tubusu (obr. 10.1a) – riziko ztráty stability nebo lomu tubusu
- Tlačení tubusu při podepřeném víku (obr. 10.b) – riziko ztráty stability nebo lomu tubusu
- Vytahování víka a tubusu pomocí šroubových spojů (obr. 10.c)
- Vytlačování víka z tubusu (část tubusu je odřezaná - obr. 10.d)



obr. 10.1 Modely možných způsobů testování pevnosti svaru

obrázky jsou ve 2D v rotační symetrii (osa rot. symetrie je y); u c) modrá – šrouby s podložkou

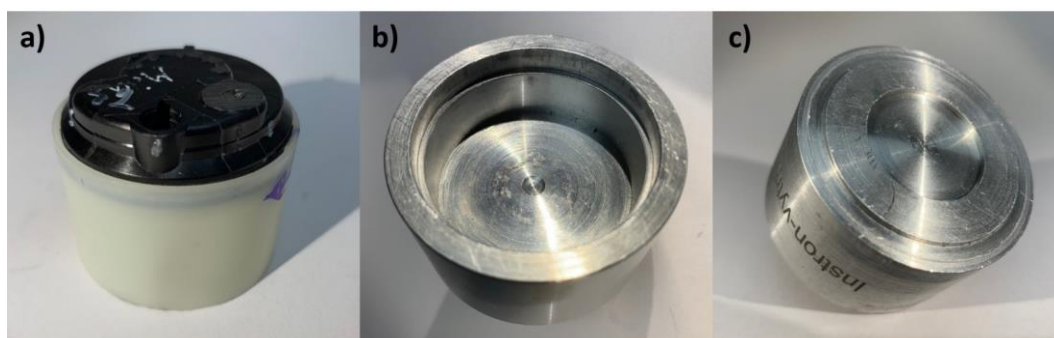
Kompletní tvorba výpočtových modelů zde není uvedena. Uvedené jsou pouze podstatné skutečnosti. Celý postup a veškeré výsledky jsou v příloze B.

Všechny metody byly modelovány jako rotačně symetrické (vliv nesymetrických prvků nebyl uvažován). Model materiálu byl ortotropní lineárně elastický s hodnotami z tab. 9.2. Víko a tubus byly spojeny v rámci modelu geometrie. Oblast svaru byla modelována podle doporučení IIW – efektivní vrubová napětí, z důvodu eliminace singularity napětí. Bylo analyzováno první hlavní napětí, tzn. maximální tahové (dále pouze napětí).

Metody **a)** a **b)** vykazovaly největší napětí v okolí dna tubusu. U metod **c)** a **d)** byly napěťové špičky v oblasti svaru. Konkrétní hodnoty napětí jsou pouze fiktivní a není třeba je uvádět. Podstatné jsou oblasti s maximálními hodnotami napětí. Pro testování byla vybrána metoda **d)**. Metoda **c)** by totiž byla náročná na provedení. Před lisováním by bylo třeba vyvrtat do tubusů a vík díry pro šrouby, které by se tam následně spolu s destičkami připevnil. Kvůli šroubům by bylo nutné vyrobit nový lisovací a svařovací přípravek.

10.1.2 Příprava vzorku

U metody **d)** bylo nutné vzorek před zkouškou upravit. Nejprve se odřezala část tubusu. Řezalo se 30 mm od horní hrany tubusu na pásové pile Proxxon (viz příloha A). Poté se na stejném zařízení uřezaly tvarové prvky na vrchní straně víka (ventil apod. - *obr. 10.2a*).



obr. 10.2 a) upravený vzorek b) díl přípravku A c) díl přípravku B

10.1.3 Vytlačovací přípravek

Zkouška byla provedena na totožném stroji jako lisování. Stejně jako u lisování bylo tedy třeba vytvořit určitý přípravek. Ten se obdobně skládal ze dvou částí (*obr. 10.2b,c*). Část **A** byla nepohyblivě upevněna k ploše stroje. Kontakt dílu **A** se vzorkem byl pouze přes vrchní hranu tubusu. Zároveň byla část navržena tak, aby bylo možné protlačit celé víko. Část **B** byla přimontována k příčníku stroje a dosedala přesně na spodní povrchy víka.

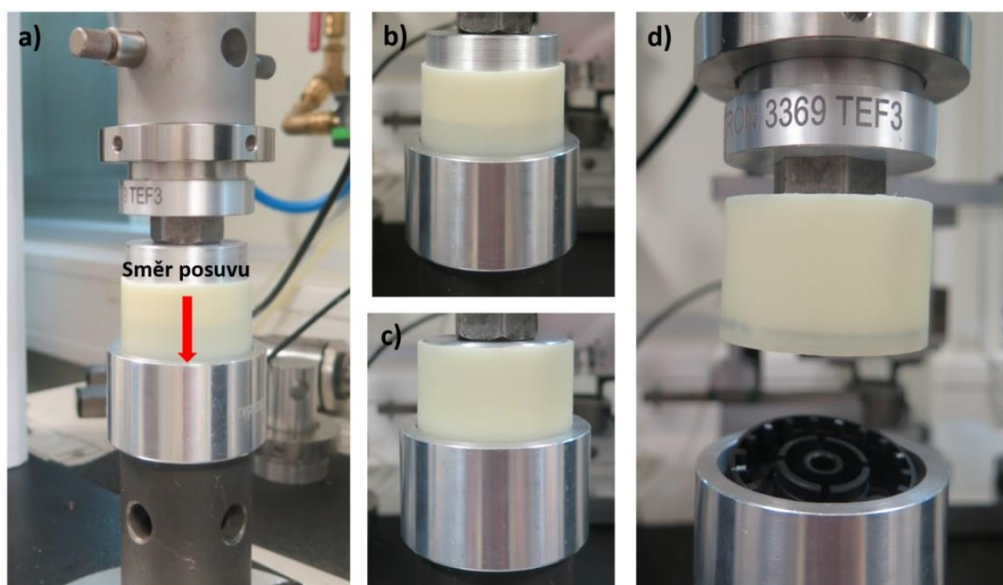
10.1.4 Nastavení a realizace procesu

Proces byl stejný pro MIN, NOM i MAX. Parametry testu jsou v *tab. 10.1*.

tab. 10.1 Nastavení procesu vytlačování

Předběžný test	Test	Podmínka 1 tlakové protažení	Podmínka 2 limitní zatížení	Podmínka 3 práh zatížení
$v = 30 \text{ mm/min}$ $F = 30 \text{ N}$	$v = 10 \text{ mm/min}$ $f_{VZ} = 5 \text{ ms}$	6 mm	20 kN	80%

Testováno bylo 30 vzorků pro každý typ, tzn. 90 vzorků celkem. Výstupem ze zkoušky byla závislost vytlačovací síly na posuvu příčníku. Proces vytlačování je znázorněn na *obr. 10.3*.

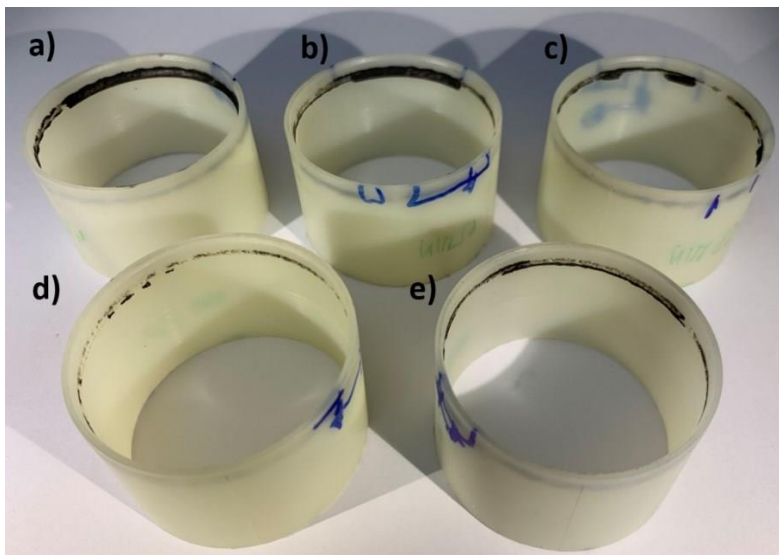


obr. 10.3 Proces vytlačování

a) znázornění posuvu b) výchozí pozice c) konečná pozice d) oddělení vzorků po vytlačení

10.1.5 Analýza lomové plochy

Z obr. 10.3d je patrné, že při zkoušce došlo k úplnému oddělení víka a tubusu. Na obr. 10.4 jsou znázorněny typické lomové plochy, které se vyskytovaly u experimentu.



obr. 10.4 Typické lomové plochy u tubusu

poznámka: viditelná část lomové plochy je vztažena k oblasti **B** víka - a) po celém obvodu oblasti **B** došlo k lomu základního materiálu; b) jen na části; c) drobné úlomky; d), e) „čistě“ utržený svar

Na první pohled lze usuzovat, že k lomu došlo ve svaru. Při bližším zkoumání lomové plochy, bylo zjištěno, že u určitých vzorků zůstal na lomové ploše černý materiál (obr. 10.4a,b,c). To znamená, že v těchto místech nemuselo dojít k porušení svaru, ale základního materiálu. Proto byl vytvořen přehled, u jakých vzorků a v jaké části svaru (oblast **A** a **B** viz kap. 9.4.4)

došlo k porušení soudržnosti základního materiálu namísto svarového spoje. Vyhodnocení je v *obr. 10.5*. 100 % je zde 30 vzorků. Stejně vyhodnocení bylo provedeno i pro jednotlivé oblasti **A** a **B** (*obr. 10.5 dole*). Zde je již vyhodnocena pouze ta část vzorků, u které zůstal základní materiál na lomové ploše.



obr. 10.5 Rozdělení vzorků na základě lomové plochy

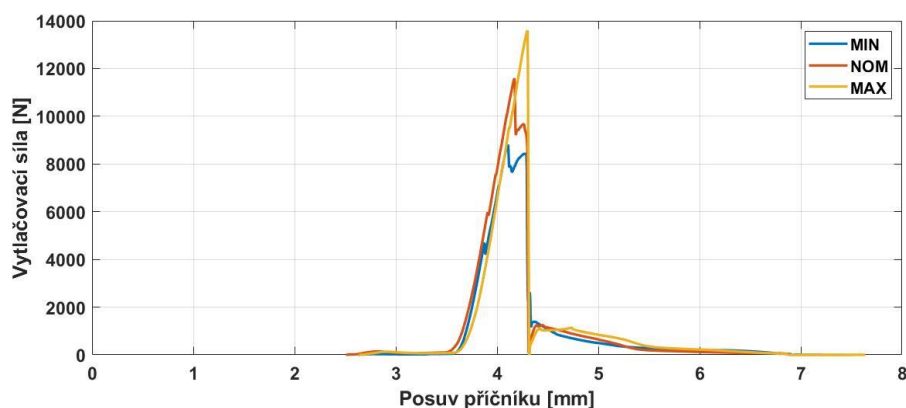
Z *obr. 10.5* vyplývá, že nejčastěji materiál zůstal v oblasti **B**, tzn. v „tuhé“ oblasti. To mohlo být způsobeno např. rozdílnou orientací vláken a faktory zmíněné v *kap. 6.1*. Vybrané lomové plochy (víko) byly zkoumány pod mikroskopem Keyence (viz. příloha A). Z mikroskopu nešlo jednoznačně určit, zdali došlo k iniciaci trhliny v základním materiálu, nebo ve svaru. Na základě *kap. 5.2.1*, kde je zmíněno, že tepelně ovlivněná oblast je ve vzdálenosti až 0.33 mm od svaru, byl učiněn předpoklad, že mechanismem vzniku lomu bylo porušení soudržnosti svaru.

Poznámka k iniciaci trhliny v základním materiálu: V blízkosti svarové oblasti víka je tvarový přechod vrub (viz *obr. 9.14*). Vrub má ale pro každou pozici, typ víka apod. jiný poloměr zaoblení. Právě koncentrace napětí v této oblasti mohla způsobit u určitých vzorků (malý poloměr zaoblení) iniciaci trhliny v základním materiálu.

10.2 Presentace výsledků experimentálního měření

10.2.1 Závislost vytlačovací síly na posuvu příčnicku

Závislosti vytlačovací síly na posuvu příčnicku pro jednotlivé vzorky jsou v příloze B. Na *obr. 10.6* je pouze porovnání reprezentativních vzorků pro různý přesah.



obr. 10.6 Porovnání závislosti vytlačovací síly na posuvu příčniku pro různý přesah

10.2.2 Statistické zpracování

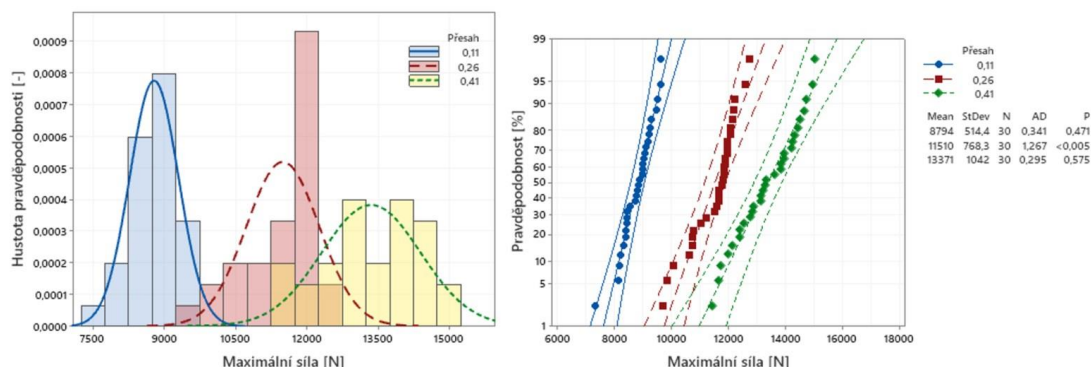
Statisticky byla vyhodnocena maximální vytlačovací síla (porušení soudržnosti svarového spoje). Pro zpracování byl použit software Minitab. Hlavními cíli zpracování je:

- Určit vypovídající hodnotu resp. interval hodnot popisující pevnost svaru pro různý přesah.
- Rozhodnout zdali je rozdíl v pevnostech způsobený rozdílností v přesahu či nikoliv.

Postup vyhodnocení vychází z [27].

a) Přiřazení teoretického rozdělení empirickému rozdělení

Z obr. 10.7 vlevo vyplývá, že vzorky typu NOM neodpovídají normálnímu rozdělení. Na obr. 10.7 vpravo lze vidět distribuční funkce příslušných normálních rozdělení spolu s 99% konfidenčními intervaly. Zároveň jsou na něm uvedeny *p-hodnoty* pro Anderson Darlingův test normality. Ty potvrzují, že typ NOM nelze popsat normálním rozdělením. Proto je dále vyhodnocován medián a jsou použity neparametrické testy. Bylo by možné použít i transformaci dat na normální např. podle Johnsona. V tomto případě by ale bylo nutné transformovat i data MIN a MAX a došlo by ke ztrátě informací.



obr. 10.7 Vlevo: histogramy s proložením normálního rozdělení; vpravo: distribuční funkce
vysvětlení: přesah - 0.11 = MIN; 0.26 = NOM; 0.41 = MAX; mean – aritmetický průměr;
StDev – směrodatná odchylka; N – počet vzorků; AD – Anderson Darlingův koeficient; P – *p-hodnota*

b) Určení mediánu

Mediánové hodnoty jsou v *tab. 10.2*.

tab. 10.2 Mediánové hodnoty

Víko	MIN	NOM	MAX
Medián [N]	8850	11790	13300

c) Neparametrické testování – „Mood’s median test“

„Mood’s median test“ je analogií analýzy rozptylu z hlediska neparametrických testů. Úkolem je rozhodnout, jestli jsou mediány jednotlivých souborů stejné, nebo ne. Tento test se používá v případě, že histogramy nemají podobný tvar. Vyhodnocuje se *p*-hodnota. Testované hypotézy jsou následující:

Nulová hypotéza H_0 : Mediány jsou totožné

Alternativní hypotéza H_1 : Mediány nejsou totožné

Výsledek testu je na *obr. 10.8*. Na hladině významnosti 0.05 se nulová hypotéza H_0 zamítá. Výsledná *p*-hodnota byla 0. Na obrázku jsou zároveň 95% konfidenční intervaly pro medián.

Descriptive Statistics

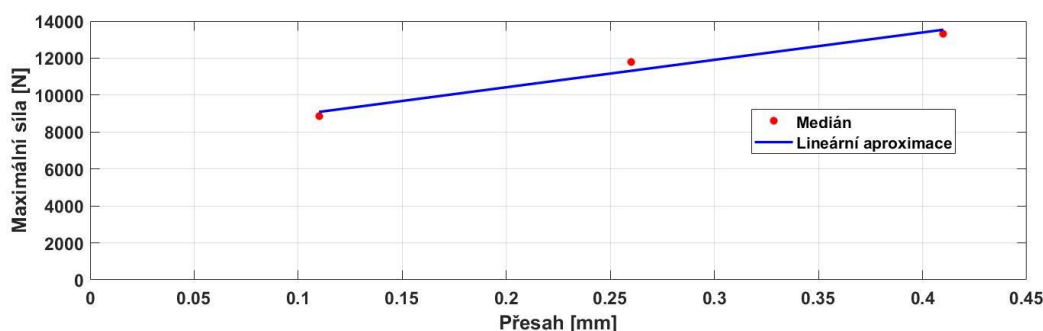
Přesah	Median	N <= Overall Median	N > Overall Median	Q3 - Q1	95% Median CI
0,11	8852,8	30	0	752,75 (8456,66; 9042,74)	
0,26	11791,9	13	17	1030,82 (11514,2; 11926,2)	
0,41	13297,0	2	28	1768,00 (12847,1; 13950,0)	
Overall	11664,5				

Test

Null hypothesis	H_0 : The population medians are all equal		
Alternative hypothesis	H_1 : The population medians are not all equal		
DF	Chi-Square	P-Value	
2	53,07	0,000	

obr. 10.8 Výsledek testování

Lze tedy tvrdit, že rozdílnost v maximální vytlačovací síle (pevnost svaru) je s 95% pravděpodobností vytvořena rozdílným přesahem. Zobrazení mediánů maximální vytlačovací síly v závislosti na přesahu s lineární aproximací je na *obr. 10.9*.



obr. 10.9 Vytlačovací síla jako funkce přesahu

d) Vyhodnocení nejistot měření

Obecně je vyhodnocován medián. Proto je nejistota typu A mediánová odchylka (MAD). Výslednou nejistotou měření je rozšířená nejistota pro statistickou jistotu 99%

(viz tab. 10.3). Kompletní postup je v příloze B. Mediánové hodnoty maximálních vytlačovacích sil se zahrnutím rozšířené nejistoty jsou v tab. 10.4.

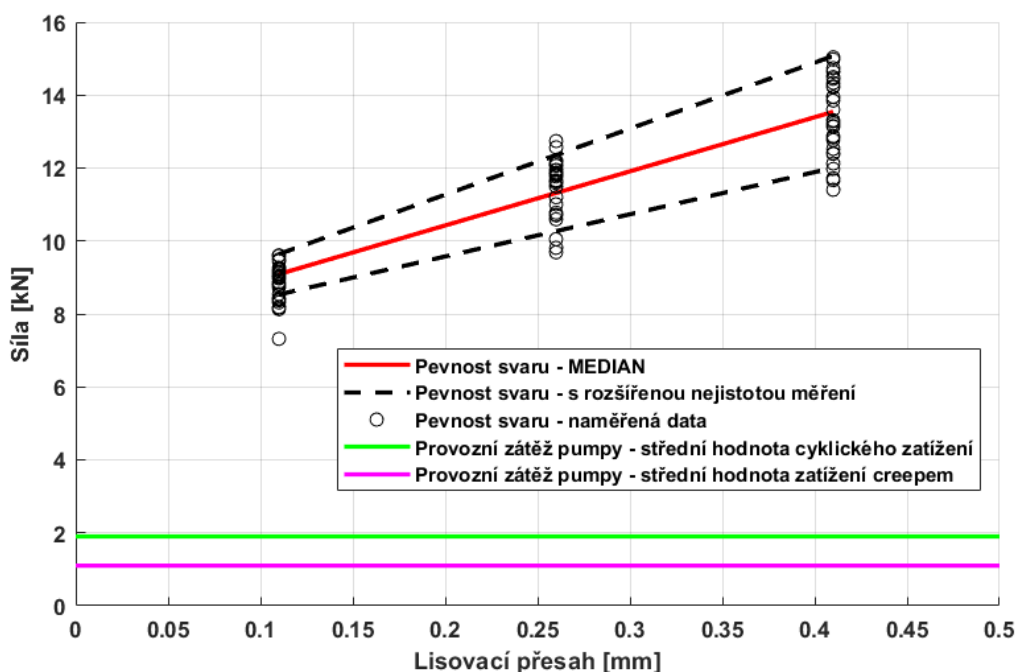
tab. 10.3 Rozšířená nejistota pro maximální vytlačovací sílu

Vzorek	MIN	NOM	MAX
U [N]	790	570	1770

tab. 10.4 Maximální vytlačovací síly se zahrnutím nejistot měření

Vzorek	MIN	NOM	MAX
Síla [N]	8850±790	11790±570	13300±1770

Na obr. 10.10 je zobrazena pevnost svaru na lisovacím přesahu spolu s naměřenými daty a 99% intervaly. Ty jsou vytvořeny z lineární aproximace rozšířených nejistot měření. Dále jsou tam zobrazená provozní zatížení (střední hodnoty) z obr. 6.1 (tlak p byl přepočten na sílu ze vztahu $F=p \cdot S$).



obr. 10.10 Závislost pevnosti svaru na lisovacím přesahu

10.3 Analýza výsledků experimentálního měření

Z tab. 10.4 vyplývá, že se mediány maximální vytlačovací síly liší v řádu kN, konkrétně rozdíl mezi NOM a MIN je 2.7 kN a mezi MAX a NOM 1.9 kN. Lze tedy tvrdit, že s vyšším lisovacím přesahem roste statická pevnost svaru. Toto tvrzení potvrzuje i obr. 10.9. Z obrázku zároveň vyplývá lineární závislost mezi mediánem maximální vytlačovací síly a lisovacím přesahem. Z tab. 10.4 dále vyplývá, že nejnížší rozšířená nejistota měření je v případě vzorků typu NOM. Nejistota nevýznamně roste s nižším přesahem a významně s vyšším přesahem (stejný trend má samotná mediánová odchylka viz příloha B).

Z toho vyplývá, že pro kvalitnější výrobní proces je vhodné lisovat s přesahem v intervalu $\langle 0.11; 0.26 \rangle$ mm.

Poznámka k posuvu příčnicku: Z *obr. 10.6* vyplývá, že k porušení soudržnosti došlo u všech typů vzorků při posuvu příčnicku cca. 4 mm. Deformace jsou ale při tomto experimentu nepodstatné, jelikož je v nich zahrnuto vymezení vŕlí stroje, vymezení vŕlí mezi přípravkem a vzorkem apod.

Z *obr. 10.10* vyplývá, že typické provozní zatížení je přibližně 4x nižší, než pevnost svaru při minimálním přesahu, a 6x nižší než pevnost svaru při maximálním přesahu. Dále je nutné zmínit, že z důvodu lineární aproximace nejistot měření je nejnižší rozptyl u přesahu MIN a ne NOM. Obrázek opět potvrzuje výše uvedený závěr, že je vhodné lisovat v intervalu $\langle 0.11; 0.26 \rangle$.

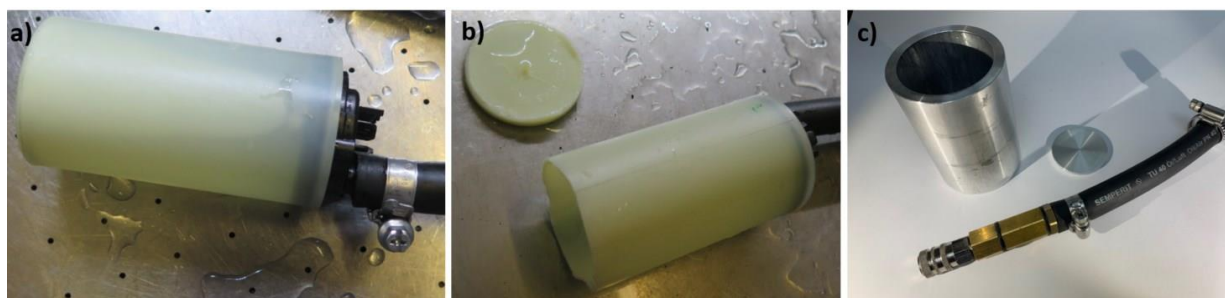
11 TLAKOVÁ DESTRUKČNÍ ZKOUŠKA

Hlavním cílem této zkoušky bylo otestovat těsnost svaru. Klasická zkouška těsnosti se nejčastěji provádí v těsnostní komoře. Ta je ale omezena do tlaku 6 bar. Jelikož je svar při provozu zatěžován přibližně tlakem o velikosti 7 bar a víc, bylo třeba ho otestovat v komoře pro tlakovou destrukční zkoušku tzv. Berstdruck (viz příloha A). Zde je povoleno testovat až do 300 bar. Lze zde měřit také těsnost, jelikož je měření ukončeno při netěsnosti vzorku (výrazný pokles tlaku). V rámci této zkoušky bylo sekundárním cílem otestovat pevnost svaru na zatížení vnitřním přetlakem. Získala by se limitní hodnota vnitřního tlaku. Tuto hodnotu by bylo možné použít při navrhování testu na pevnost svaru, např. při vysokoteplotním *creepu*.

11.1 Realizace procesu řešení

11.1.1 Prvotní zkouška

Realizace zkoušky je na *obr. 11.1a*. Nejprve byla vyvrtána díra do ventilu, aby bylo možné vzorky naplnit vodou. Následně byla k ventilu připevněna hadice (doporučené zatížení hadice je 45 bar). Proces byl nastaven tak, že se tlakovalo s gradientem 1 bar/s. Při startu zkoušky došlo nejprve k odvzdušnění při tlaku 3 bar a poté k postupnému zvyšování tlaku.



obr. 11.1 Tlaková destrukční zkouška

a) realizace procesu zkoušky b) lom zkušebního tělíska c) zkušební přípravek

Pro nastavení procesu bylo použito pět vzorků typu NOM. K lomu a netěsnosti zkušebního tělíska došlo průměrně při tlaku **29±0.2 bar**. Nedošlo k porušení svaru, ale základního materiálu, konkrétně tubusu v místě dna (*obr. 11.1b*). Zde totiž z důvodu vrubu došlo ke koncentraci napětí. Tento vrub má totiž „téměř“ nulové zaoblení.

Z prvotního měření tedy plyne závěr, že vzorky lze testovat na těsnost, ale není možné otestovat jejich pevnost na zatížení vnitřním přetlakem.

11.1.2 Testování se zkušebním přípravkem

Z výše uvedeného důvodu, byl navržený přípravek skládající se z válcové nádoby a tenkého disku (*obr. 11.1c*). Válcová nádoba má vnitřní průměr o velikosti vnějšího průměru tubusu. Disk má za cíl vyplnit vybrání spodní strany dna tubusu. Přípravek zabráňuje deformaci

tubusu v radiálním směru. Proto by mělo dojít k lomu v oblasti svaru. Znovu bylo testováno pět vzorků typu NOM.

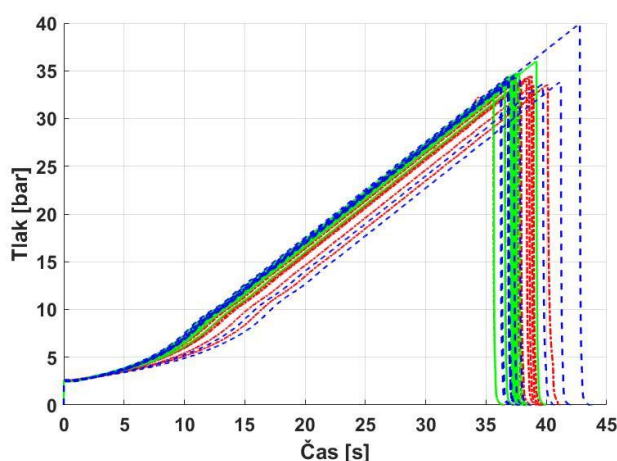
Ani tímto způsobem se však nepodařilo otestovat pevnost svaru na zatížení vnitřním přetlakem. Stejně jako v prvním případě došlo k poruše u dna tubusu, tentokrát se ale maximální tlak pohyboval v rozmezí $< 33;43 >$ bar. Získala se tedy určitá představa o tlaku, který svar vydrží, ale není limitní.

11.1.3 Závěr k realizaci tlakové destrukční zkoušky

Žádným z výše uvedených způsobů se nepodařilo otestovat pevnost svaru. Proto byl testován a vyhodnocován pouze vliv lisovacího přesahu na těsnost svaru. Měřeno bylo 10 vzorků od každého typu. Při každém testu byl použit přípravek z *obr. 11.1c*.

11.2 Prezentace výsledků experimentálního měření

11.2.1 Závislost tlaku na čase a statistické zpracování



obr. 11.2 Záznam tlaku na čase

(modrá – MIN; červená – NOM; zelená – MAX)

tab. 11.1 Statistické charakteristiky tlaku

Aritmetický průměr [bar]	34.1
Směrodatná odchylka [bar]	1.3
Max. tlak [bar]	39.9
Min. tlak [bar]	32.0

Závislosti tlaku na čase pro jednotlivé typy vzorků jsou na *obr. 11.2*. Jelikož nedošlo k porušení svaru v případě této zkoušky, není vytvořeno kompletní statistické zpracování. Jsou uvedeny pouze základní charakteristiky vypočítané pro všechny vzorky dohromady (viz *tab. 11.1*). Ve zpracování nejsou uvažovány vzorky použité pro naladění procesu.

11.3 Analýza výsledků řešení

Je třeba poznamenat, že v tomto případě není nutné rozlišit vzorky podle typu víka, jelikož vždy došlo k porušení mimo svar. K netěsnosti a zároveň destrukci vzorku došlo průměrně při tlaku 34.1 bar (viz *tab. 11.1*). Lom součásti byl vždy u dna tubusu. Každý vzorek, nezávisle na přesahu, těsnil při tlaku 32 bar. Z toho vyplývá, že velikost lisovacího přesahu (v testovaném intervalu) nemá vliv na těsnost svarového spoje.

12 VÝPOČTOVÝ MODEL LISOVÁNÍ – TVORBA DÍLČÍCH MODELŮ

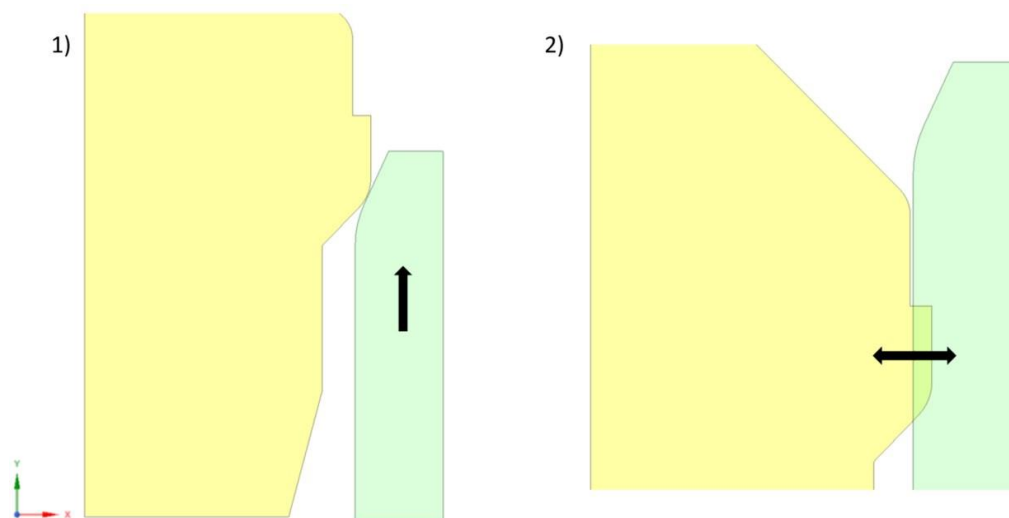
12.1 Úvod k výpočtovému modelování

Cílem diplomové práce je vytvořit výpočtový model, pomocí kterého by bylo možné hodnotit pevnost LTW svaru. Prvotní úvaha je taková, že na základě výsledků z lisování bude vytvořen výpočtový model lisovacího procesu. Z výpočtu se získá velikost kontaktního tlaku mezi víkem a tubusem a jeho rozložení (šířka svaru). Tyto faktory jsou společné a zároveň rozdílné pro všechny typy víka. Na jejich základě bude následně vytvořen model vytlačovací zkoušky, kde se zkombinuje rozdílnost v kontaktním tlaku s metodikou IIW. Jako výstup se získá rozložení tvarového napětí pro jednotlivé přesahy, na jejichž základě se vytvoří obecný postup k hodnocení LTW svaru na základě přesahu.

S dostupnými programovými prostředky a finančními a časovými možnostmi není možné modelovat samotné laserové svařování. Není možné zahrnout mikrostrukturní přeměny, deformace vláken apod. Jedná se tedy o tzv. „black box modeling“. To znamená, že jsou známé vstupní a výstupní údaje, ale informace o probíhajících jevech v soustavě jsou neznámé.

Lisovací proces lze modelovat dvěma přístupy:

- 1) Modelování reálného procesu lisování (obr. 12.1 - 1)
- 2) „Penetrace“ kontaktních povrchů v lisovací hloubce (obr. 12.1 - 2)



obr. 12.1 Přístupy modelování lisovacího procesu (žlutá – víko; zelená – tubus)

1) přístup 1: relativní pohyb mezi povrchy ve směru y 2) přístup 2: relativní pohyb ve směru x

Rozdíl ve výstupech (kontaktní tlak) mezi těmito přístupy může nastat v případě použití elasto-plastického modelu materiálu nebo v případě uvažování dynamických jevů. V práci jsou modelovány oba přístupy (vždy se jedná o statickou úlohu – pomalé lisovací rychlosti). Prvním přístupem je validován výpočtový model v závislosti na lisovací síle získané z měření. Kontaktní tlak získaný z prvního přístupu je následně porovnán s kontaktním tlakem z druhého

přístupu. V případě rovnosti je možné v dalších výpočtech použít pouze druhý přístup, který je méně náročný na výpočtový čas.

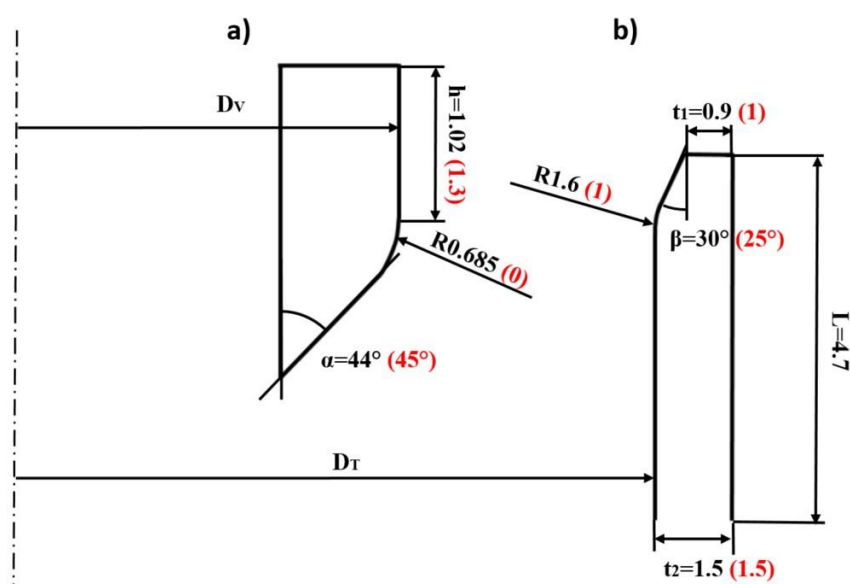
Následující kapitoly popisují tvorbu dílčích modelů nutných k vytvoření výpočtového modelu lisování a částečně i k modelu vytlačování.

12.2 Model geometrie

Modely geometrie víka a tubusu byly vytvořeny na základě výrobních výkresů v programu Ansys SpaceClaim R1. Modely byly vytvořeny ve 3D. Pro kratší výpočtové časy a jednodušší tvorbu výpočtového modelu je předpokládána rotační symetrie zkušebních těles. Ověření použití rotační symetrie je v příloze C. Tyto nové 2D modely byly upraveny na základě přeměřených rozměrů. Modely geometrie jsou stejné pro oba přístupy modelování lisovacího procesu.

12.2.1 Měření rozměrů

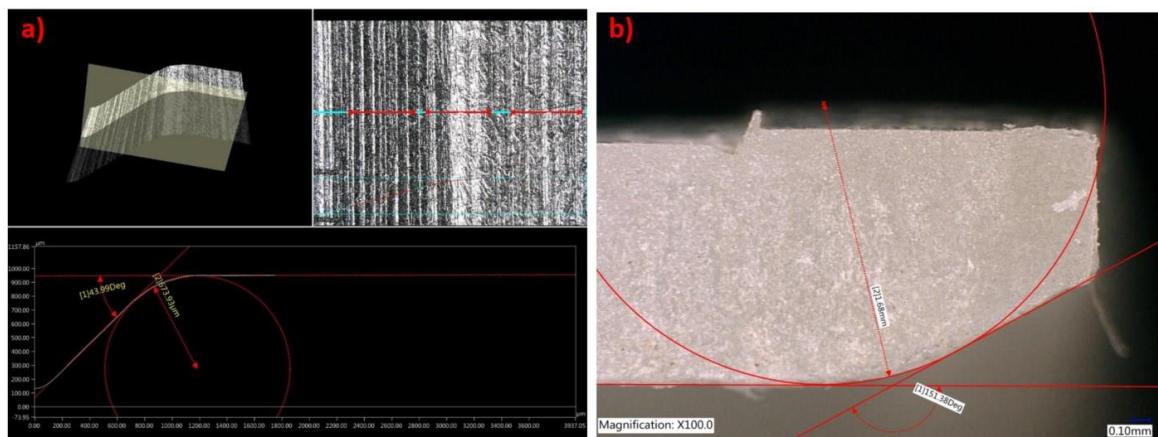
Podstatné pro validaci výpočtového modelu bylo mít správné rozměry kontaktních oblastí víka a tubusu. Podstatné rozměry jsou na *obr. 12.2*. Velikosti D_V a D_T jsou z *tab. 9.7*. L je hloubka zalisování získaná z *tab. 9.9*. Rozměr t_2 byl získán měřením pomocí posuvného měřítka. Úhel α byl dopočítán na základě ostatních rozměrů. Zbylé rozměry byly změřeny na mikroskopu Keyence.



obr. 12.2 Podstatné rozměry – svařovaná oblast

a) víko b) tubus; černě jsou použité rozměry a červeně rozměry z výkresu

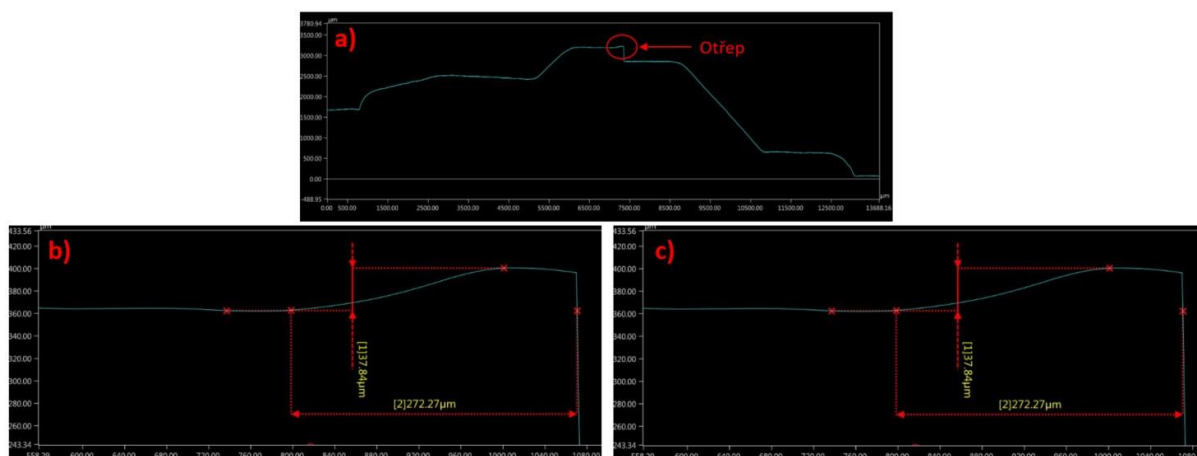
Pomocí mikroskopu byly vytvořeny snímky svařovaných oblastí víka a tubusu. V integrovaném softwaru byly následně změřeny zbývající rozměry. Z finančních důvodů byly měřeny dva vzorky na stejném místě. Použita byla vždy průměrná hodnota. Ukázka snímků je na *obr. 12.3*. Zbylé snímky jsou v příloze C.



obr. 12.3 Snímky a měření pomocí světelného mikroskopu Keyence
a) víko b) tubus

Poznámka: Měřeno bylo pouze víko s nominálním rozměrem, protože vliv měřených rozměrů na výpočtový model lisování byl zjištěn až po svaření zkušebních vzorků. Z časových důvodů se svařovali v jeden den všechny vzorky a jediná zbylá víka byla rozměru NOM.

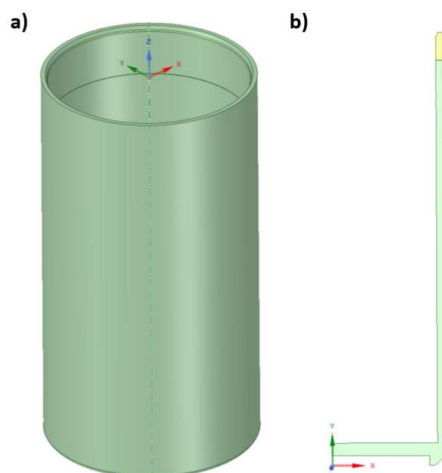
Mikroskop byl použit i pro změření velikosti otřepu. Tyto rozměry byly použity pro zjištění vlivu otřepu na lisovací sílu a kontaktní tlak (příloha C). Měření bylo provedeno pouze pro jeden vzorek (opět typ NOM). Snímky jsou na obr. 12.4.



obr. 12.4 Snímky otřepu z mikroskopu
a) obrys části vnější strany víka; b),c)detail svařované geometrie s otřepem
poznámka: osy mají odlišné měřítka

12.2.2 Tubus

3D model geometrie tubusu a jeho transformace do 2D je na *obr. 12.5*. Na rovině provedení řezu nezáleží, jelikož tubus je rotačně symetrický. Osa rotace je osa y.

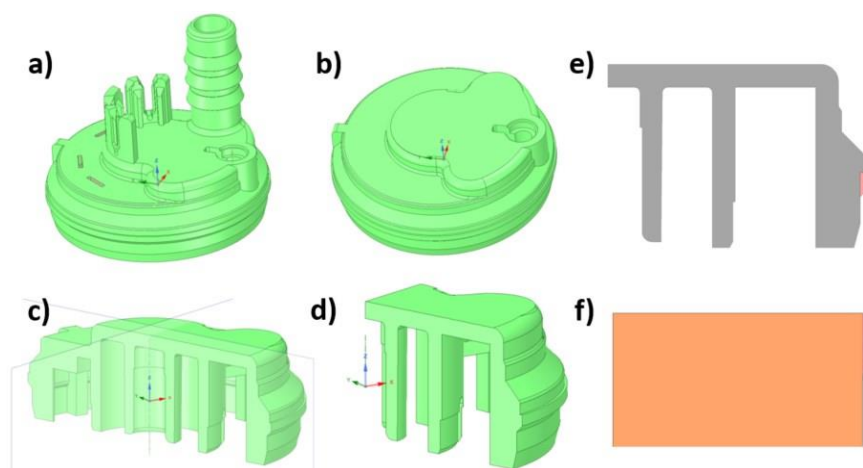


obr. 12.5 Model geometrie tubusu

a) 3D model b) 2D model – z důvodu zjemnění sítě je rozdělen na 2 tělesa (žlutá a světle zelená)

12.2.3 Víko

3D model víka a jeho transformace do 2D je na *obr. 12.6*. Rovina řezu byla vytvořena tak, aby v rovinném modelu byla obsažena oblast **B** („tuhá“). Byly vytvořeny čtyři rovinné modely geometrie víka. Tři pro různé přesahy (MIN, NOM, MAX) a jeden pro typ NOM s otřepem. V rámci modelu geometrie víka nebyly uvažovány tvarové prvky na vrchní straně víka (ventil apod.), jelikož nemají žádný „tuhostní“ vliv na lisování a vytlačování.



obr. 12.6 Model geometrie víka

a) 3D model b) 3D model bez tvarových prvků c) zobrazení rovin řezů d) 1/4 3D model e) 2D model - z důvodu zjemnění sítě je rozdělen na 2 tělesa (červená a šedá barva); f) detail otřepu

Rozdíly mezi ostatními modely geometrie jsou pouze ve svařované oblasti (červené těleso viz *obr. 12.6e*). Rozdílnost v modelech pro různé přesahy je na *obr. 9.7*. Detail vymodelovaného otřepu je na *obr. 12.6f*.

12.3 Model materiálu

Materiál Grivory HTV 4H1 byl modelován nehomogenním⁶ ortotropním lineárně pružným modelem materiálu. Isotropní model materiálu nebylo možné použít z důvodu vysoké tuhosti ve směrech kolmých na vlákna (v tomto případě směry x a z). Porovnání isotropního a ortotropního modelu je v příloze C. Ortotropní model byl vytvořen na základě experimentálních hodnot získaných z *tab. 9.2* a moldflow analýzy vytvořené v softwaru Autodesk Moldflow Insight 2019.0.2. Model materiálu je stejný pro oba přístupy modelování lisovacího procesu. Moldflow analýza byla provedena pouze pro víko typu NOM.

12.3.1 Moldflow analýza (MFA)

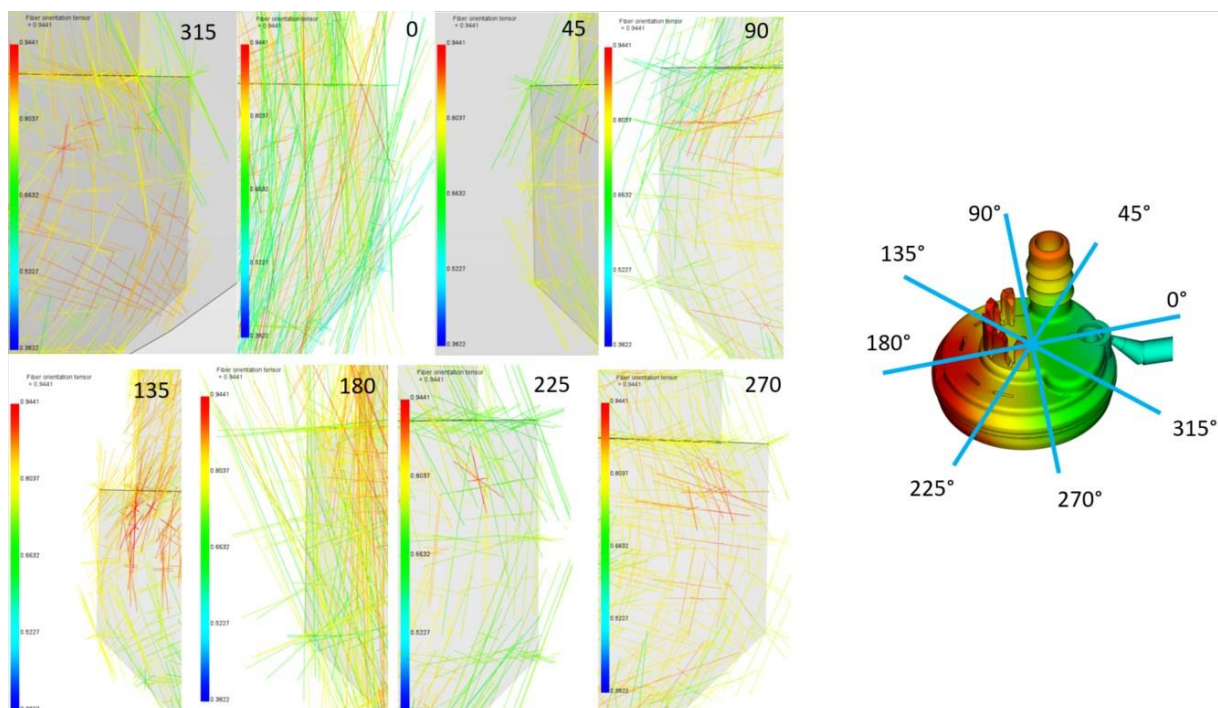
V této práci slouží MFA k určení orientace skelných vláken ve zkušebním tělese a eventuálně k detekci kritických míst. Orientaci vláken lze totiž v Ansysu zohlednit dvěma přístupy:

- 1) Rozdělení objektu na podoblasti, každé je přiřazen specifický materiálový souřadný systém při použití ortotropního modelu materiálu – 2D a 3D úlohy
- 2) Nástroje jako např. MoldSim NL od společnosti CADFEM (výstup z MFA slouží přímo jako vstup do Ansysu) – lineární 3D úlohy (špatná konvergence při zahrnutí nelinearit)

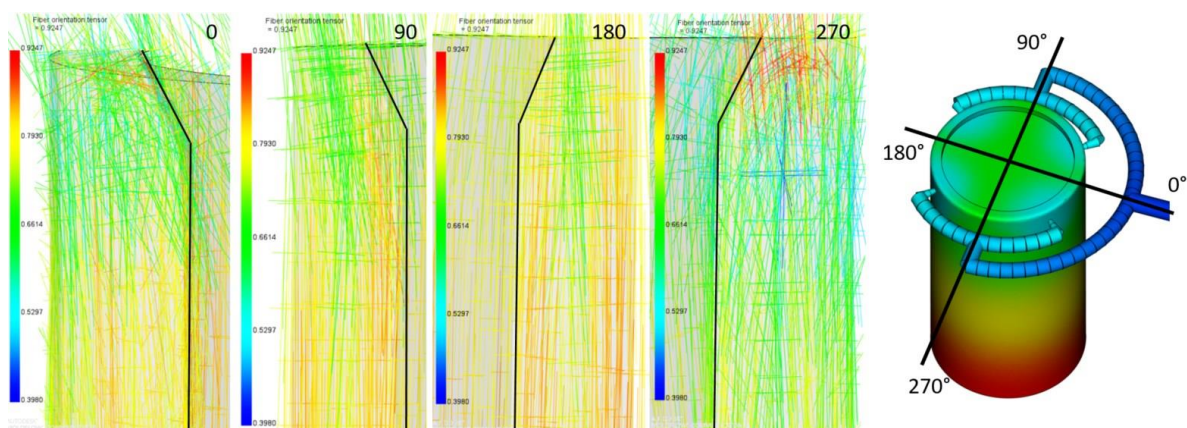
Jelikož se jedná o nelineární 2D úlohu (viz dále), je v práci využitý první přístup.

Popis samotné MFA je v příloze D. Zde je uvedena pouze výsledná orientace vláken. Podstatná je orientace vláken v oblasti svaru zejména v tuhé oblasti. V ostatních oblastech je nepodstatná. Orientace vláken se v softwaru zobrazí jako tzv. tenzor orientace vláken. Ten přidá každému elementu, resp. uzlu, hodnotu v intervalu $(0,1)$, kde 1 znamená 100% pravděpodobnost, že v dané oblasti jsou vlákna orientována v prvním hlavním směru materiálového souřadného systému vlákna (zde podélný směr). Z grafického znázornění lze poté získat představu o rozložení a orientaci vláken v souřadném systému objektu. Grafické znázornění orientace vláken ve svarové oblasti je pro víko na *obr. 12.7* a pro tubus na *obr. 12.8*. Pravděpodobnost orientace a rozložení vláken z hlediska globálního modelu je nepodstatná.

⁶ Nehomogenitou je myšleno přiřazení lokálních materiálových souřadných systémů rozdílným oblastem

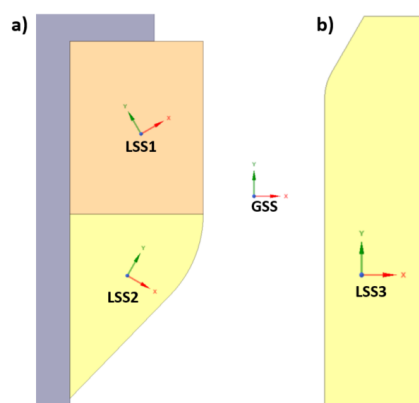


obr. 12.7 Pravděpodobná orientace vláken ve svarové oblasti víka
znázorněny jsou charakteristické řezy po 45°



obr. 12.8 Pravděpodobná orientace vláken ve svarové oblasti tubusu
znázorněny jsou charakteristické řezy po 90° (postačující z hlediska rotační symetrie a počtu
vstřikovacích bodů); černě je znázorněn obrys tubusu; výška řezů je 5 mm od horního okraje

Na základě obr. 12.7 a obr. 12.8 lze vytvořit lokální materiálové souřadné systémy viz obr. 12.9.



obr. 12.9 Vytvoření lokálních souřadných systému na základě MFA

a) svarová oblast víka – rozdělená na dvě podoblasti b) svarová oblast tubusu; GSS – globální souřadný systém; LSS – lokální souřadný systém; osa y – podélný směr vláken; LSS1 a LSS2 jsou natočeny o $\pm 30^\circ$ okolo osy z

12.3.2 Materiálové charakteristiky v závislosti na teplotě

Z kap. 9.4.4 vyplývá, že svar je po celé výšce rovné části svarové oblasti víka u každého typu přesahu. Výpočty ale ukázaly (viz dále), že kontaktní tlak není po celé stykové linii u žádného výpočtového modelu. To je způsobeno tím, že nebylo zohledněno zpoddajnění kontaktní oblasti v rámci změny teploty při svařování (větší deformace povrchů a s tím spojené rozšíření působení kontaktního tlaku). Tento jev byl zohledněn pomocí teplotně závislých modulů pružnosti (viz tab. 12.1).

tab. 12.1 Teplotně závislé materiálové charakteristiky

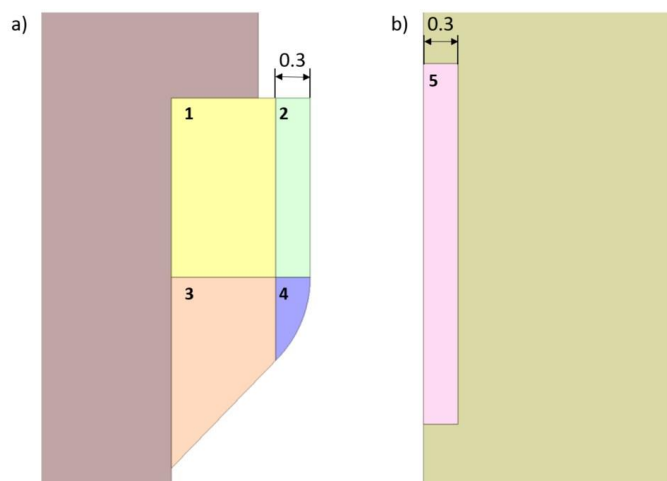
T [°C]	E _x [MPa]	E _y [MPa]	E _z [MPa]	G _{xy} [MPa]	G _{xz} [MPa]	G _{yz} [MPa]	μ _x [-]	μ _{xz} [-]	μ _{yz} [-]
22	5239	14468	5239	2763	1765	2763	0.368	0.484	0.368
300	524	1447	524	276	176	276	0.368	0.484	0.368

poznámka: teplota byla zvolena 300°C pouze z toho důvodu, že se shoduje s teplotou tavení použitého materiálu; obecně ale nezáleží na hodnotě použité teploty

Hodnoty modulů pružnosti při teplotě 300 °C jsou oproti hodnotám při pokojové teplotě 22 °C v poměru 1:10. Při tomto nastavení docházelo ke kontaktu po celé svarové oblasti u každého výpočtového modelu. Změna Poissonových poměrů v závislosti na teplotě není uvažována.

Aplikace teplotně závislých modulů pružnosti

Podle kap. 5.2.1 je teplotně ovlivněná oblast při svařování v hloubce $0.28 \div 0.33$ mm pod povrchem. Proto byla svarová oblast rozdělena na další podoblasti (obr. 12.10). Rozdělení a aplikace teplotně závislých materiálových charakteristik byly provedeny pouze pro druhý přístup modelování lisovacího procesu.



obr. 12.10 Rozdělení na podoblasti z hlediska teplotní závislosti

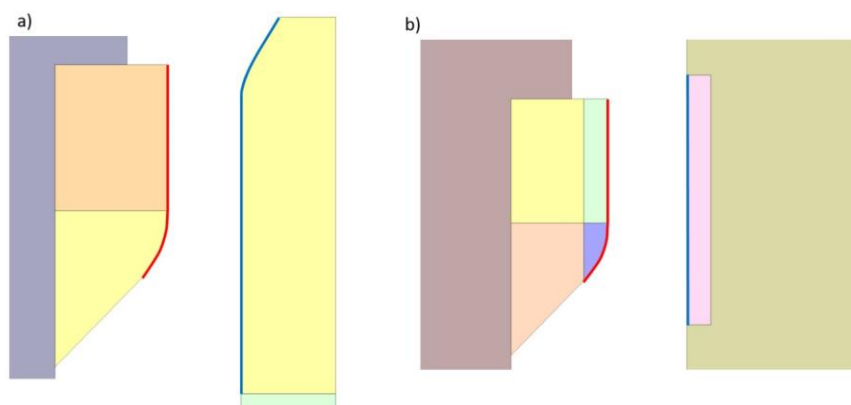
a) víko b) tubus; teplotně závislé charakteristiky byly použity jen pro oblasti 2, 4 a 5

12.3.3 Shrnutí

Materiál byl modelován jako ortotropní nehomogenní lineárně pružný. Zohlednění proměnlivé orientace vláken v objektu bylo provedeno pomocí lokálních souřadných systémů, kde podélný směr vláken reprezentovala osa y . Zohlednění změny oblasti styku těles při svařování bylo provedeno pomocí teplotně závislých modulů pružnosti.

12.4 Model styku těles

Ve výpočtovém modelu byly použity kontakty typu *bonded* a *frictional*. *Bonded* bylo použito mezi rozdělenými podoblastmi víka a tubusu pro zaručení jemné sítě konečných prvků. U těchto kontaktů bylo ponecháno základní nastavení od Ansysu. Kontakt *frictional* modeluje styk těles se třením. Byl použit pro styk svarových oblastí víka a tubusu (obr. 12.11).



obr. 12.11 Aplikace kontaktu typu *frictional*

a) přístup 1 b) přístup 2; červené křivky značí stranu styku CONTACT a modré křivky TARGET

Nastavení kontaktu *frictional* je na obr. 12.12 a bylo stejné pro oba přístupy.

Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	0,18
Scope Mode	Manual
Behavior	Asymmetric
Trim Contact	Off
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Normal Lagrange
Small Sliding	Program Controlled
Detection Method	Nodal-Projected Normal From Contact
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0,
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	5,e-002 mm
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
Offset	0, mm
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

obr. 12.12 Nastavení kontaktu *FRictional*

Použitá formulace a velikost součinitele tření byla určena na základě opakovaných výpočtů (viz příloha C).

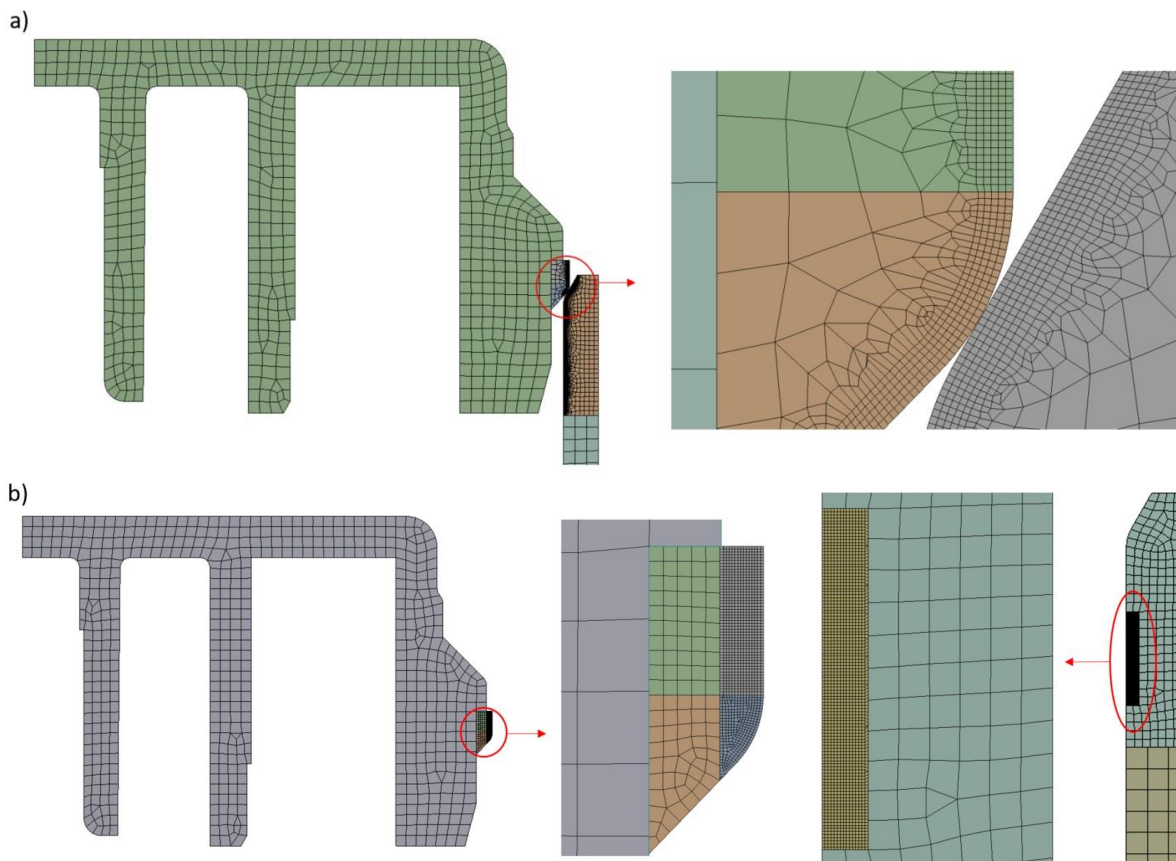
12.5 Model sítě konečných prvků

Po vytvoření modelu geometrie v programu Ansys Space Claim byl model přenesen do prostředí Ansys Workbench, kde byl vytvořen model sítě konečných prvků (dále jen síť). Nejdůležitější bylo síť dostatečně zjemnit ve svarové oblasti z důvodu styku víka a tubusu. V této oblasti byl zároveň vyhodnocován kontaktní tlak. Jemná síť také zlepšuje konvergenci úlohy.

Použité prvky byly rovinné s kvadratickou bázeovou funkcí PLANE183 a pro kontaktní plochy (křivky) prvky CONTA172 a TARGE169. Ve stykové oblasti byla vytvořena síť z čtyřúhelníkových prvků o velikosti hrany prvku 0.02 mm. V závislosti na vzdálenosti od stykové oblasti byly použity větší velikosti hrany prvků (postupně 0.1, 0.2 a 0.5 mm). Tyto prvky už vykazovaly degenerované tvary. Počet jednotlivých typů prvků pro oba přístupy je v tab. 12.2. Ukázka sítě je na obr. 12.13.

tab. 12.2 Počet použitých prvků pro jednotlivé přístupy modelování

Přístup	PLANE183	CONTA172	TARGE169	Prvků celkem
1	5263	175	362	5800
2	4475	396	420	5291



obr. 12.13 Síť konečných prvků – a) přístup 1 b) přístup 2

poznámka: není zobrazena celá síť tubusu z důvodu velikosti obrázku; u obrázku b) jsou víko a tubus odděleny z důvodu překryvu sítě.

Při zjemnění sítě již nedocházelo ke změně sledovaných hodnot (penetrace, kontaktní tlak), a proto byla tato síť vyhodnocena jako dostatečná.

Poznámka ke kvalitě sítě: Kvalita sítě byla kontrolována na základě *aspect ratio*. Ve stykové oblasti byla hodnota⁷ *aspect ratio* prvků 1.59 u přístupu 1 i 2 stejně jako u většiny zbylých prvků. Ojedinele prvky vykazovaly *aspect ratio* 2.78. Tyto prvky byly mimo stykovou oblast.

Poznámka k proměnlivosti sítě: Počet prvků v tab. 12.2 je pro víko typu NOM. Pro MIN a MAX se velikost sítě odlišuje pouze v počtu prvků PLANE183. Rozdíl je ± 200 prvků.

12.6 Model okrajových podmínek

12.6.1 Určení okrajových podmínek (OP) na základě tlakových folií

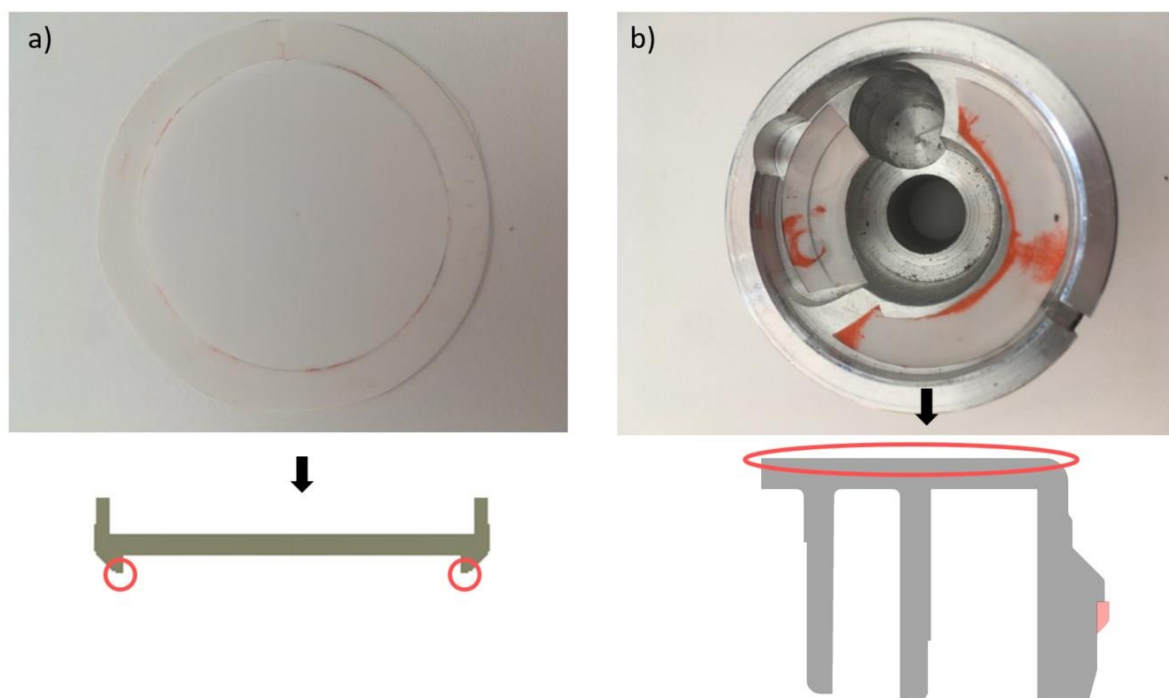
V realitě nedochází ke styku mezi tělesy po celé ploše z důvodu nerovnosti povrchů, geometrických tolerancí apod. Jelikož v tomto případě má rozdílnost v OP velký vliv

⁷ Při hodnotě *aspect ratio* 1 se jedná o čtverec – ideální prvek

na výsledný kontaktní tlak a dále u modelu vytlačovací zkoušky na napětí, byly OP určeny na základě tlakových fólií (Fujitsu – příloha A).

Poznámka k principu tlakových fólií (TF): Existují dva typy TF jednolisté a dvoulisté. V práci jsou použity dvoulisté. Oba listy jsou vytvořeny na polyesterové bázi. Jeden list je z jedné strany pokrytý vrstvou mikrokapslí plněných materiálem formujícím barvu. Druhý list je také z jedné strany pokrytý vrstvou obsahující materiál vyvolávající barvu. Jakmile se tyto dva listy dají těmito stranami na sebe a zároveň je na ně aplikován tlak, mikrokapsle prasknou a dojde k reakci obou materiálů, čímž vznikne červená barva. Kapsle jsou navrženy tak, aby k jejich porušení došlo v závislosti na velikosti tlaku. To znamená, že hustota červené barvy odpovídá určitému tlaku. V práci jsou TF použity pouze pro zjištění míst styku těles, takže zde není provedena analýza velikosti kontaktního tlaku.

Pro lisování se zjišťovala oblast styku mezi víkem a dílem A a dnem tubusu a dílem B (viz *obr. 9.8a*). Folie byly vždy vloženy mezi přípravek a víko nebo tubus a poté na soustavu bylo zatlačeno. Na *obr. 12.14* je znázorněn výsledek aplikace TF pro zjištění styku těles při lisování. U tubusu (*obr. 12.14a*) došlo ke zčervenání pouze na okraji, tzn. že vnitřní část dna nebyla s dílem B v kontaktu. U víka (*obr. 12.14b*) bylo zčervenání proměnlivé a nešlo přesně určit kde OP aplikovat. Výsledky z výpočtu nebyly na změny u této OP citlivé, a proto byla pro aplikaci OP použita celá vrchní strana víka.



obr. 12.14 Aplikace TF pro lisování

a) tubus – TF zčervenala pouze na okraji, tzn. že vnitřní část tubusu není namáhána b) víko – TF zčervenala téměř po celém obvodu a na částech i po celé šíři víka

12.6.2 Přístup 1

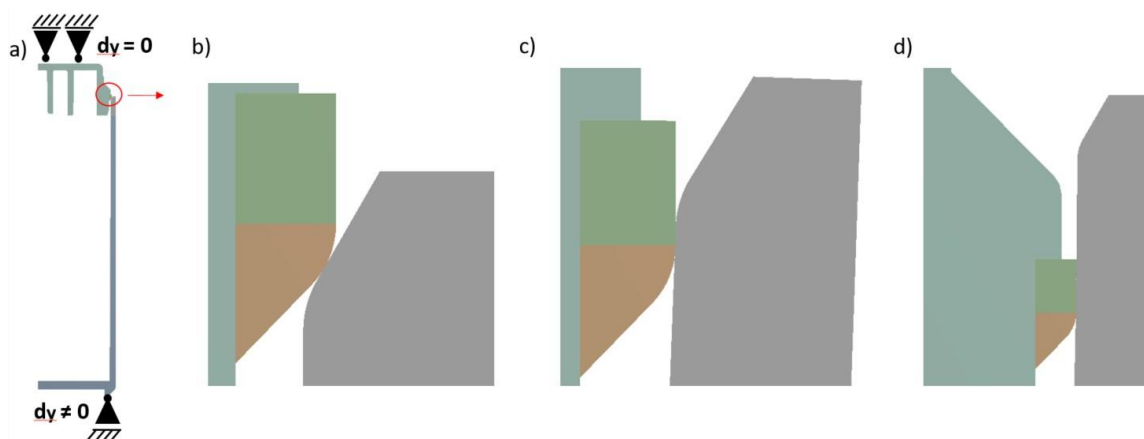
Okrajové podmínky (OP) byly nastaveny na základě parametrů procesu lisování a *kap. 12.6.1*. Víku bylo na vrchní hraně zabráněno v pohybu ve směru y. Část dna tubusu byla

deformačně zatěžována ve směru y . Pro dosažení stejné hloubky zalisování (4.7 mm od vrchní hrany tubusu), byl deformační posuv rozdílný pro každý typ víka (tab. 12.3). Aplikace přístupu je znázorněna na obr. 12.15.

tab. 12.3 Deformační posuv tubusu

Víko	MIN	NOM	MAX
Posuv ve směru y [mm]	3.7	3.8	4.2

poznámka: posuv je vztažen ke globálnímu souřadnému systému z obr. 12.9

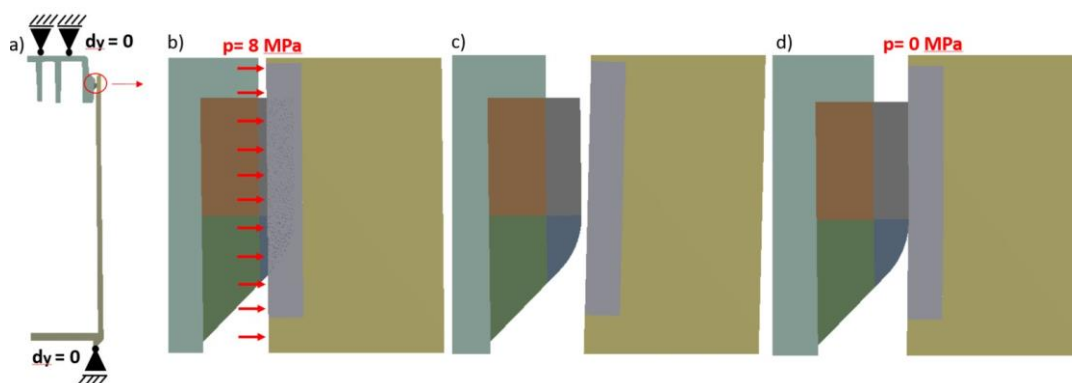


obr. 12.15 Aplikace přístupu 1

a) deformační OP – globální model b) výchozí pozice c) překonání radiusu d) konečná poloha

12.6.3 Přístup 2

Tento přístup je vytvořen na principu tzv. fiktivního lisování. Horní části víka a dna tubusu je zabráněno v pohybu ve směru y . Na začátku prvního kroku výpočtu je pomocí funkce *Contact step control* „vypnut“ kontakt *frictional* mezi víkem a tubusem. Tubus je na části vnitřní strany zatížen tlakem 8 MPa. Na začátku druhého kroku je kontakt znovu „zapnut“ a tlak se postupně snižuje na nulu. Při nastavení jemného krokování dojde ke styku mezi povrchy. Proces je znázorněn na obr. 12.16.



obr. 12.16 Aplikace přístupu 2

a) deformační OP – globální model b) 1. krok – FRICTIONAL je vypnutý c) konec 1. kroku d) konec 2. kroku – FRICTIONAL je zapnutý a tlak je 0 MPa

Poznámka k aplikaci tlaku: Při použití silové OP vznikají v oblasti aplikace prvky typu SURF153. V tomto případě se jedná o dalších 123 prvků.

12.7 Nastavení řešiče

12.7.1 Přístup 1

Výpočet byl rozdělen na tři kroky (*loadsteps*) viz *tab. 12.4*. Pro výpočet bylo nutné zapnout *large deflection* (velké posuvy, přetvoření a rotace). Výsledky z klasického řešiče (pouze první derivace) se totiž neshodovaly s řešením v rámci velkých deformací. Všechna ostatní přednastavená nastavení zůstala beze změny. Celkový čas výpočtu byl 3min a 30s.

tab. 12.4 Rozdělení řešení přístupu 1

Loadstep	Posuv tubusu v y [mm]	Počet mezikroků	Poznámka
1	0.01	1	Překonání vůle mezi tělesy
2	1	50	Přechod mezi zaobleními
3	3.7 ; 3.8 ; 4.2	100	Relativní pohyb rovných částí

12.7.2 Přístup 2

Výpočet byl rozdělen na dva *loadsteps* (*kap. 12.6.3* a *tab. 12.5*). Stejně jako u přístupu 1 bylo nutné zapnout *large deflection*. Rozdíl v kontaktním tlaku totiž byl 10 MPa v porovnání s klasickým řešičem. Vše ostatní zůstalo beze změny. Celkový čas výpočtu byl 32 vteřin.

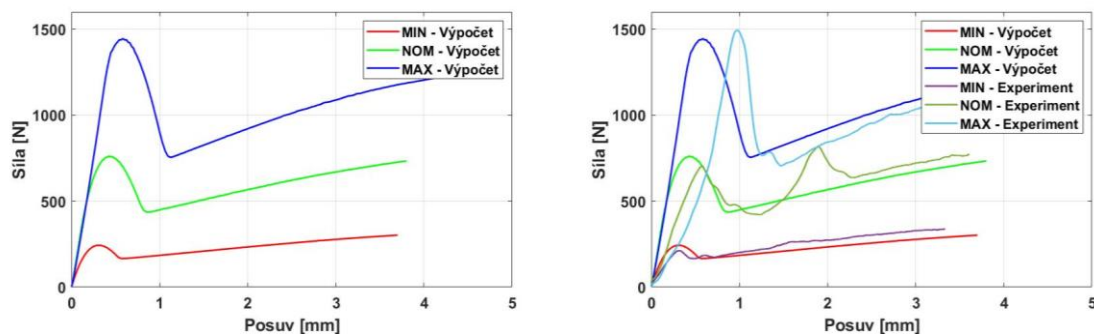
tab. 12.5 Rozdělení řešení přístupu 2

Loadstep	Aplikovaný tlak [MPa]	Počet mezikroků
1	8	1
2	0	40

13 DÍLČÍ VÝSLEDKY VÝPOČTOVÉHO MODELU LISOVÁNÍ

13.1 Porovnání výsledné reakční síly z výpočtového modelu s experimentem

V této kapitole je porovnávána reakční síla od deformačního posuvu tubusu z přístupu 1 s lisovací silou z experimentálního měření. Ve výpočtech nebyl uvažován ořep od dělicí roviny. Vliv ořepu je v příloze C. Výsledné reakční síly jsou na *obr. 13.1 vlevo*.



obr. 13.1 Reakční síla v ose y

vlevo: průběh reakční síly z výpočtu; vpravo: srovnání s experimentálními hodnotami

Porovnání specifických hodnot z výpočtu s hodnotami z experimentu (*tab. 9.11*) je v *tab. 13.1*. Z tabulky vyplývají vysoké rozdíly ve sledovaných hodnotách mezi výpočtem a experimentem (absolutní hodnota relativní chyby). Porovnání je ale provedeno pro mediánové hodnoty měření. Při uvažování celého intervalu měřených hodnot lze tvrdit, že průběhy reakčních (lisovacích) sil z výpočtu leží v intervalu měřených hodnot. Na *obr. 13.1 vpravo* je grafické porovnání průběhu lisovacích sil z výpočtu s jejich nejbližšími průběhy z experimentu.

tab. 13.1 Porovnání specifických hodnot z průběhu lisování mezi experimentem a výpočtem

Srovnávaná veličina	Max. síla v přechodu [N]			Max. síla na konci lisování [N]		
Typ víka	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
Experiment - Medián	130	605	1330	294	680	867
Výpočet	245	762	1446	310	750	1227
Relativní chyba [%]	88	26	9	5	10	42

Z *obr. 13.1* lze usoudit, že příslušná maxima sil (přechod mezi zaobleními a maximum na konci lisování) jsou téměř totožná (kvantifikace je považována za nepodstatnou), stejně tak i směrnice růstu síly po poklesu.

13.2 Porovnání deformace tubusu v radiálním směru (osa x)

Další veličinou, na které lze ověřit úroveň výpočtového modelu je deformace tubusu v radiálním směru (osa x). Měření bylo totožné s postupem v *kap. 9.2.3* (měření vnitřního průměru tubusu). Tentokrát byl měřen vnější průměr tubusu ve vzdálenosti 1, 4,7 a 8 mm

od vrchní hrany tubusu. Měření bylo provedeno pro 5 nesvařených (pouze zalisovaných) vzorků NOM. Stejně tak ve výpočtovém modelu byla vyhodnocena radiální deformace po cestě na vnitřní straně tubusu. Srovnání je v *tab. 13.2*.

tab. 13.2 Srovnání radiálních deformací

Pozice	1 mm	4.7 mm	8 mm
Průměr tubus - měření	48.89	48.71	48.43
Průměr tubus - výpočet	48.79	48.72	48.53
Relativní chyba [%]	0.21	0.01	0.21

poznámka: nebyly uvažovány nejistoty měření

Na základě porovnání z *kap. 13.1* a *13.2* lze tvrdit, že výpočtový model se shoduje s experimentem a je možné vyhodnotit kontaktní tlak.

13.3 Porovnání rozložení kontaktního tlaku mezi přístupy 1 a 2

V této kapitole je vytvořeno porovnání přístupů 1 a 2. Jedná se zejména o ověření použitelnosti přístupu 2. Ten je totiž přibližně 8x méně náročný na výpočtový čas (viz *kap. 12.7*).

13.3.1 Výpis a vykreslení kontaktního tlaku v Ansys Workbench

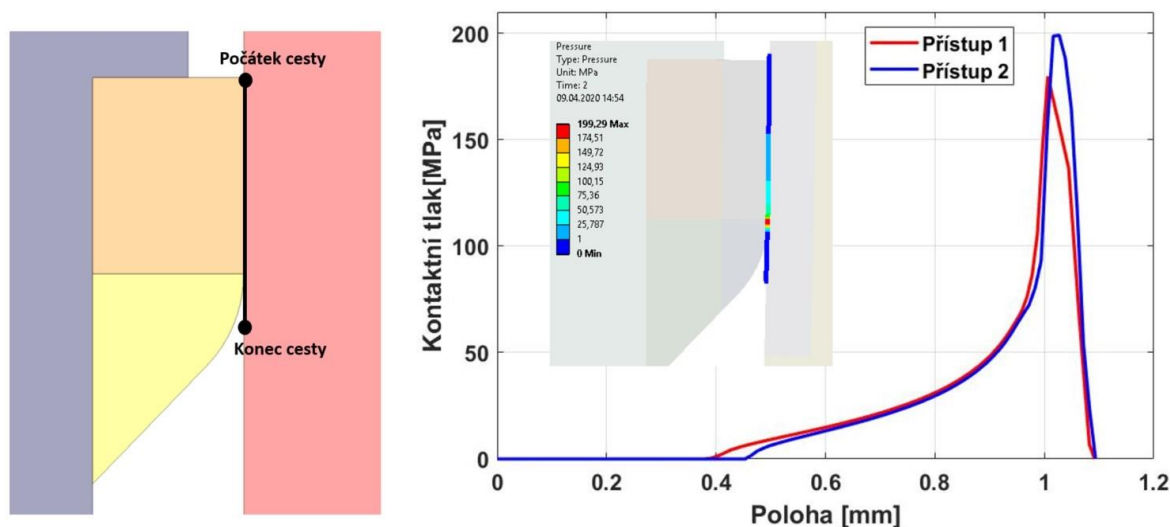
Úvodem je třeba poznamenat, že vypsání a vykreslení kontaktního tlaku po cestě není v prostředí Ansys Workbench možné při použití předprogramovaných funkcí. Lze ho získat dvěma způsoby:

- 1) Naprogramování příkazu v jazyce APDL
- 2) Záporně vzatá hodnota normálního napětí ve směru kolmém na kontaktní povrch

Způsob 2 nevyžaduje vytváření vlastního příkazu, na druhou stranu u způsobu 1 se dostanou přesné hodnoty kontaktního tlaku. V příloze C je vytvořeno srovnání obou přístupů. Vyplývá z něj, že pokud nedojde k natočení lokálního souřadného systému (LSS) vůči globálnímu vyšetřované oblasti, tak jsou oba způsoby rovnocenné. Při vyšetřování kontaktního tlaku na zakřiveném nebo deformovaném povrchu je nutné vyhodnotit kontaktní tlak způsobem 1. V tomto případě dochází k podstatnému natočení LSS (rozdíl až 15%). Proto je použitý způsob 1 pro vyhodnocení kontaktního tlaku. Tlak je vyhodnocován na kontaktní straně tubusu. Použitý příkaz je v příloze C.

13.3.2 Porovnání přístupů 1 a 2 (modelování lisovacího procesu)

Porovnání kontaktních tlaků (dále jen tlak) mezi přístupy 1 a 2 je na *obr. 13.2*. U přístupu 2 dosahují špičkové hodnoty tlaku o 20 MPa více než u přístupu 1. Na druhou stranu u přístupu 1 je delší kontaktní oblast (o 0.07 mm). Tyto rozdíly lze zhodnotit jako nepodstatné v rámci globálního pohledu na rozložení tlaku. Z toho vyplývá, že oba přístupy jsou ekvivalentní.

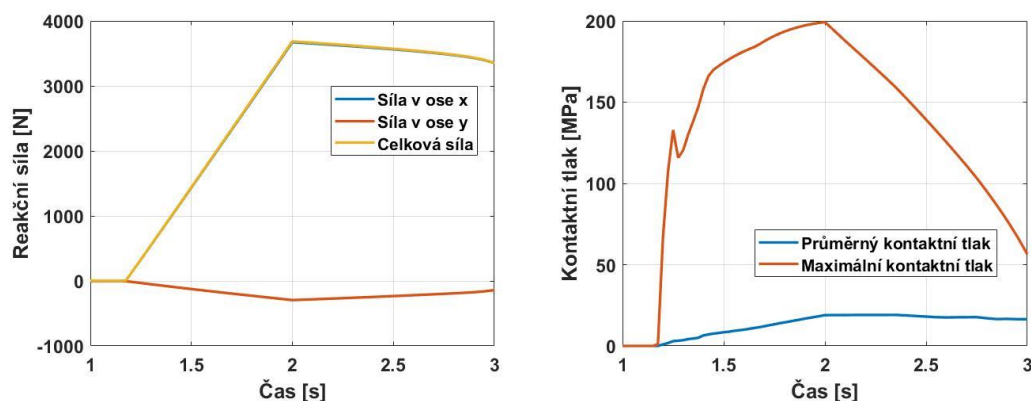


obr. 13.2 Srovnání rozložení kontaktního tlaku

poznámka: Srovnání je vytvořeno pouze pro typ NOM. Vlevo je cesta vytvořena mimo stykovou část. Graf byl ale upraven tak, že končí, jakmile tlak při poklesu dosáhne nulové hodnoty.

13.3.3 Kontrola věrohodnosti výsledků

Pro kontrolu věrohodnosti výsledku kontaktního tlaku se obecně kontroluje velikost penetrace stykových povrchů. U použité formulace „Normal Lagrange“ je zamezeno penetraci. Jelikož ale nedocházelo v průběhu lisování k oscilacím reakční síly v kontaktní oblasti a kontaktního tlaku (obr. 13.3), lze výsledné kontaktní tlaky prohlásit za věrohodné.



obr. 13.3 Ověření věrohodnosti výsledků

vlevo: průběh reakční síly v kontaktu; vpravo: průběh kontaktního tlaku

poznámka: čas reprezentuje jednotlivé výpočtové mezikroky

14 ÚPRAVA VÝPOČTOVÉHO MODELU LISOVÁNÍ

Oba přístupy modelování lisovacího procesu jsou dle *kap. 13.3.2* ekvivalentní, proto je v následujících kapitolách uvažován pouze přístup 2. Z *obr. 13.2* vyplývá, že rozložení kontaktního tlaku není po celé výšce svarové oblasti (vykazují všechny výpočtové modely – MIN, NOM, MAX), tak jako ukazuje mikrotomová analýza. Proto byl výpočtový model upraven tak, aby došlo ke kontaktu po celé výšce.

14.1 Úprava modelu okrajových podmínek

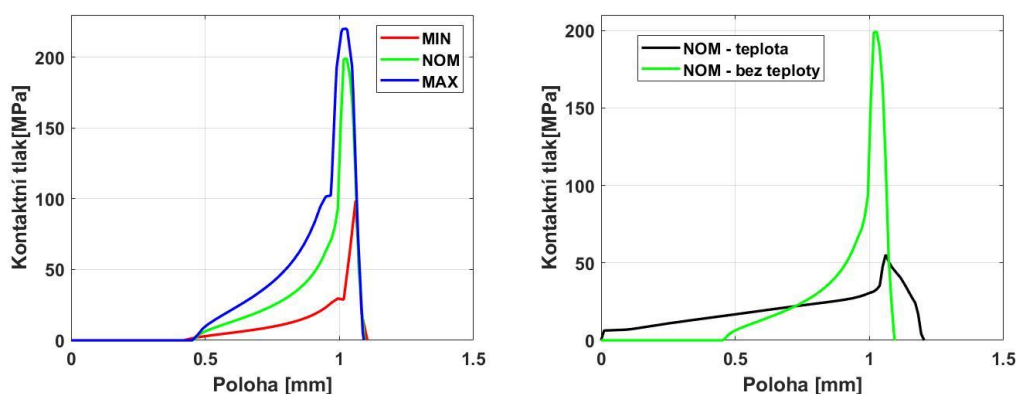
K OP z *kap. 12.6.3* je přidán další krok, ve kterém je teplotně ovlivněná oblast (*obr. 12.10*) ohřata na 300 °C (již jsou uvažovány teplotně závislé materiálové charakteristiky, viz *tab. 12.1*). Správně by měl být modelován ještě vliv přidržovací síly 1270 N dle *kap. 9.4.1*. Tento vliv je ale z hlediska řešeného problému nepodstatný (viz příloha C). Kontaktní tlak vyhodnocovaný na konci tohoto kroku reprezentuje svařovací tlak (viz *kap. 3*).

14.2 Porovnání deformace tubusu v radiálním směru po aplikaci teploty

Ověření zdali výsledky tohoto výpočtu odpovídající skutečnosti nelze ověřit tak jako v *kap. 13.2* pomocí porovnání měřené deformace tubusu v radiálním směru s vypočtenou hodnotou. Je to z toho důvodu, že ve skutečnosti dochází při svařování k vytlačení taveniny viz *kap. 9.4.4*. Tento jev nebylo možné v použitém výpočtovém prostředí modelovat.

14.3 Prezentace výstupů z výpočtu

Vyšetřovaná cesta je totožná s *obr. 13.2*. Na *obr. 14.1 vlevo* je rozložení tlaku pro jednotlivé přesahy bez aplikace teploty. Na *obr. 14.1 vpravo* je rozdíl v rozložení a hodnotách tlaku bez aplikace teploty a s aplikací (pouze pro typ NOM).



obr. 14.1 Rozložení kontaktního tlaku

vlevo: bez působení teploty; vpravo: srovnání s vlivem teploty pro vzorek NOM

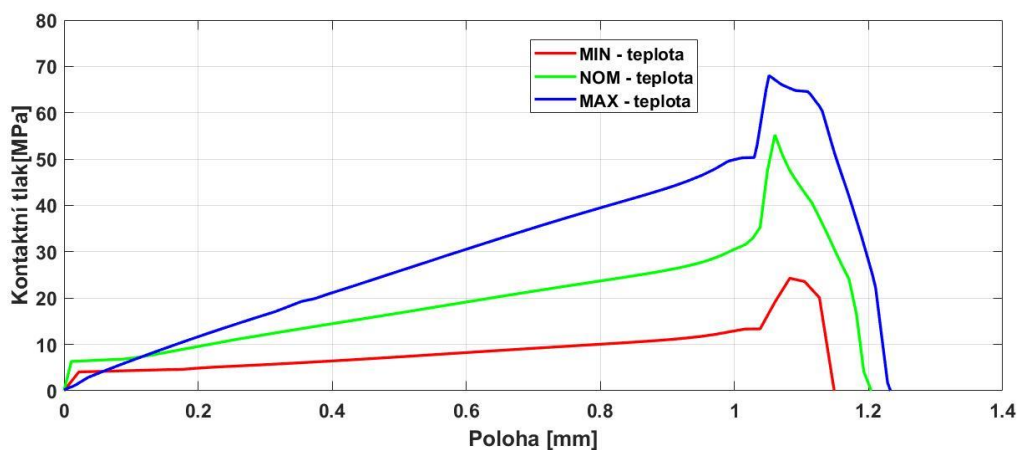
poznámka: vyšetřovaná cesta je totožná jako na *obr. 13.2*

V tab. 14.1 jsou rozdíly mezi kontaktním tlakem, délkou kontaktní oblasti (šířka svaru) pro výpočty bez teploty a s teplotou.

tab. 14.1 Rozdíly ve vybraných hodnotách mezi výpočty bez aplikace teploty a s aplikací

Typ vzorku	MIN		NOM		MAX	
Typ výpočtu	bez T	S T	bez T	s T	bez T	s T
Délka kontaktu [mm]	0.68	1.15	0.64	1.2	0.63	1.23
Maximální tlak [MPa]	99	24	199	55	220	68
Průměrný tlak [MPa]	10	9	25	20	37	30

Na obr. 14.2 je rozložení tlaku pro jednotlivé přesahy po aplikaci teploty.



obr. 14.2 Rozložení kontaktního tlaku po aplikaci teploty

poznámka: vyšetřovaná cesta je totožná jako na obr. 13.2

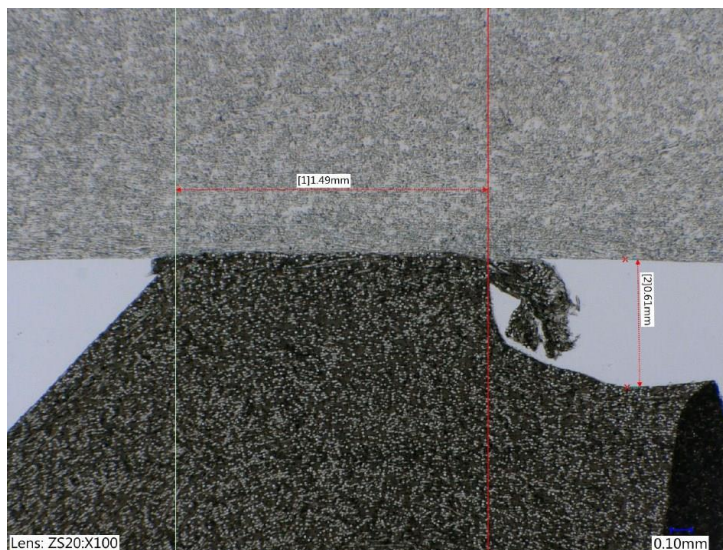
Z obrázků a tabulky vyplývá, že rozdílnými veličinami mezi jednotlivými modely jsou délka kontaktní oblasti (dále jen šířka svaru) a maximální, resp. průměrná hodnota kontaktního tlaku. Vstupy do výpočtového modelu vytlačovací zkoušky jsou tedy **šířka svaru a průměrný kontaktní tlak** z výpočtu s aplikací teploty. Tento výpočet totiž modeluje svařovací tlak. Průměrný tlak je použit namísto maximální hodnoty z důvodu eliminace singularity.

14.3.1 Porovnání šířky svaru s naměřenou hodnotou z mikrotomových řezů

Vyhodnocenou šířku svaru z rozložení kontaktního tlaku je možné porovnat s měřenou šířkou z mikrotomových řezů (viz obr. 14.3). Měření je ale pouze orientační z následujících důvodů:

- Při mechanické přípravě vzorků nelze zaručit kolmost měřené plochy
- Při pořízení mikrotomového řezu dochází k nesouměrnému smrštění ve všech směrech
- Na vzorcích nelze přesně určit rozhraní mezi taveninou přetoku a taveninou svaru (zejména kvůli vysokému obsahu plniva)

Průměrné hodnoty šířky svaru jsou v *tab. 14.2*.



tab. 14.2 Vyhodnocená šířka svaru z mikrotomů

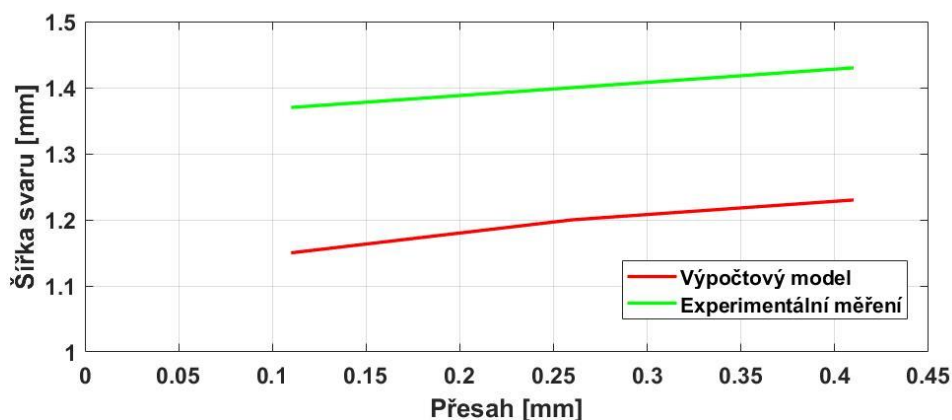
Vzorek	Průměrná šířka [mm]
MIN	1.37
NOM	1.40
MAX	1.43

obr. 14.3 Ukázka měření šířky svaru z mikrotomových řezů

poznámka: měřená byla i vzdálenost svařenců – vertikální kóta

Z tabulky vyplývá, že měřené hodnoty jsou vyšší než v *tab. 14.1*.

To může být způsobeno malým statistickým souborem (2 vzorky), nízkou úrovní rozlišitelnosti výpočtového modelu a důvody viz výše. Z hlediska rozdílů mezi jednotlivými vzorky (MIN, NOM, MAX) lze dojít k závěru, že výpočtový model odpovídá realitě, ačkoliv se neshoduje v absolutních hodnotách (viz *obr. 14.4*).



obr. 14.4 Závislost šířky svaru na lisovacím přesahu

poznámka: osa y začíná od hodnoty 1 mm

15 VÝPOČTOVÝ MODEL VYTLAČOVÁNÍ – TVORBA DÍLČÍCH MODELŮ

15.1 Shrnutí dosažených výsledků

V této kapitole je popsána tvorba výpočtového modelu vytlačovací zkoušky. Z rešerše bylo zjištěno, že přidržovací tlak (zde lisovací přesah) má vliv na pevnost svarového spoje. Z *kap. 0* vyplývá, že s rostoucím lisovacím přesahem se zvyšuje statická pevnost svarového spoje (v měřeném rozsahu). Z *kap. 14.3* byly určeny dvě veličiny: **průměrný kontaktní tlak** a **šířka svaru**, které jsou funkcí lisovacího přesahu. Lze tedy předpokládat, že právě tyto veličiny ovlivňují pevnost svaru. Další veličinou, která je rozdílná, je vzdálenost mezi tubusem a nesvařenou částí víka (vzdálenost svařenců viz *obr. 14.3 – vertikální kóta*). Změřená hodnota je zkrácená zejména kvůli proměnnosti zaoblení tvarového přechodu víka u svarové oblasti. Proto byly použity hodnoty z modelu geometrie lisování.

V *tab. 15.1* je shrnutí vstupních veličin do výpočtového modelu vytlačovací zkoušky.

tab. 15.1 Vstupní veličiny do výpočtového modelu vytlačovací zkoušky

Výpočtový model	MIN	NOM	MAX
Lisovací přesah [mm]	0.11	0.26	0.41
Průměrný kontaktní tlak [MPa]	9	20	30
Šířka svaru [mm]	1.15	1.20	1.23
Vzdálenost svařenců [mm]	0.14	0.29	0.44

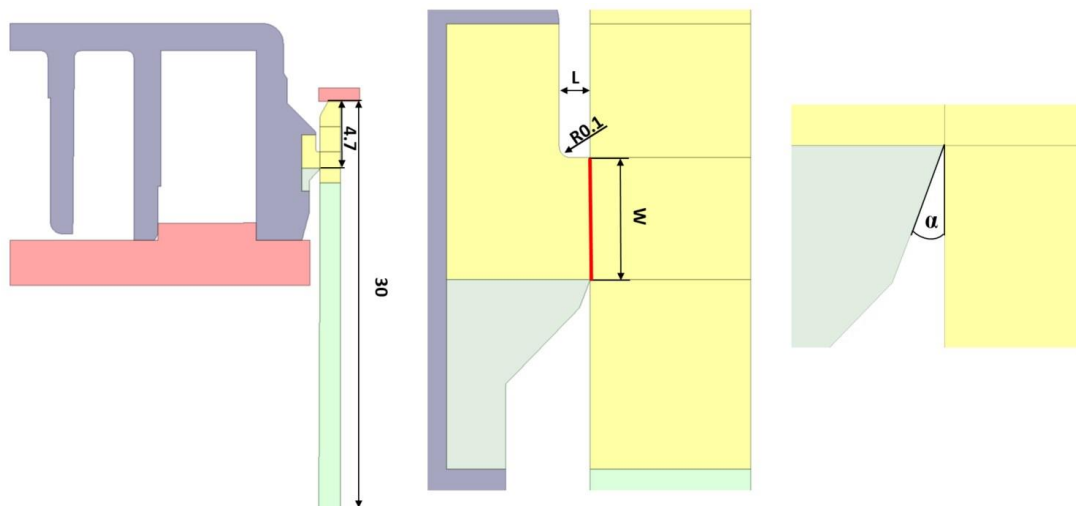
Hodnocení pevnosti je v této práci vytvořeno na základě doporučení IIW. Je zde vytvořen postup přes tvarová napětí.

Dílčí modely byly vytvořeny v prostředí Ansys SpaceClaim (model geometrie) a Ansys Workbench (ostatní modely). Stejně jako u lisování i zde byly vytvořeny tři výpočtové modely pro jednotlivé přesahy MIN, NOM a MAX.

15.2 Model geometrie

Modely geometrie byly vytvořeny v rotační symetrii. Na základě mikrotomových řezů lze tvrdit, že svar má po obvodu totožné vlastnosti. V případě tvarových napětí není modelována geometrie svaru. Model geometrie je na *obr. 15.1*. Červenými tělesy je modelován vytlačovací přípravek. Přípravek je modelován z toho důvodu, že výsledné hodnoty napětí bez přípravku se značně odlišovaly (až 20 %). Rozměry přípravku zde nejsou uvedeny, jelikož jsou nepodstatné. Všechny rozměry kromě uvedených na obrázku zůstávají totožné s modelem geometrie z *kap. 14.3*. Víko je v hloubce 4.7 mm pod horní hranou tubusu (konečná pozice po lisování). Rozměr *W* reprezentuje šířku svaru a rozměr *L* vzdálenost svařenců. Jejich velikosti se liší podle typu modelu (MIN, NOM, MAX), viz *tab. 15.1*. Protože je šířka svaru u všech modelů větší než původní rozměr svařované geometrie víka, bylo nutné upravit kontaktní

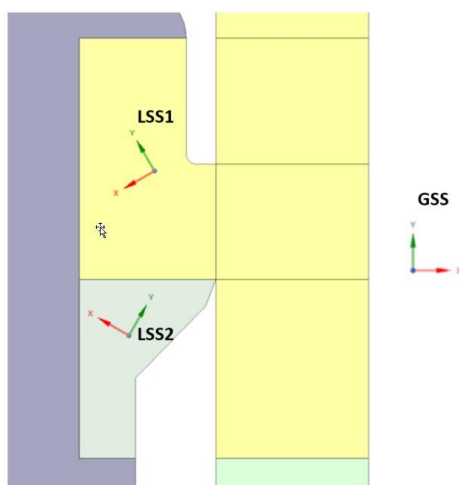
oblast, viz *obr. 15.1 vpravo*. Původní zaoblení bylo modelováno jako zkosení při ponechání stejné velikosti úhlu $\alpha = 21^\circ$ pro všechny modely. Model geometrie byl rozdělen na několik těles z důvodu rozdílné sítě konečných prvků a použitého modelu materiálu.



obr. 15.1 Model geometrie pro metodu tvarových napětí

15.3 Model materiálu

Model materiálu zkušební tělesa je totožný s *kap.12.3*. Lokální souřadné systémy (LSS) určující směr vláken (osa y) pro jednotlivá tělesa jsou na *obr. 15.2*. U těles, kde není vyznačený LSS, je orientace vláken určena globálním souřadným systémem (GSS). Materiál přípravku byl modelován jako homogenní, isotropní, lineárně pružný s hodnotami materiálových charakteristik $E=200$ GPa a $\mu=0.3$ (ocel).



obr. 15.2 Lokální souřadné systémy

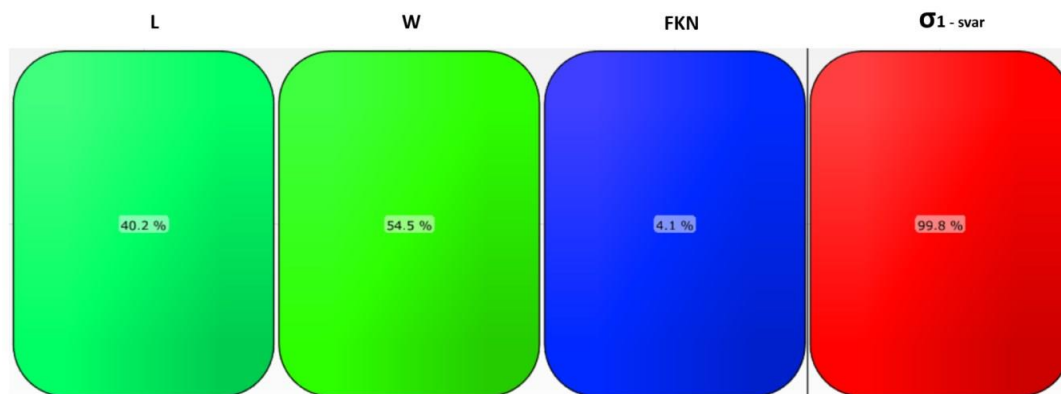
15.4 Model styku těles

15.4.1 Modelování svarového spoje

Všechny podobjekty zkušební tělesa byly spojeny v rámci sítě. V prvotním výpočtu byl místo spojení na úrovni sítě aplikován kontakt *bonded* na vyznačené červené úsečce na *obr. 15.1*. Toto spojení reprezentovalo svar.

Poznámka k nastavení kontaktu *bonded*: Kontakt *bonded* má v rámci svého nastavení možnost zadání **normální tuhosti (FKN)** a **smykové tuhosti (FKT)**. Tuhosti je možné nastavit pomocí tzv. faktoru, který vyjadřuje určitý násobek tuhosti elementů pod vrstvou kontaktních elementů nebo jako absolutní hodnotu (v Ansysu se zadává jako negativní hodnota a faktor jako pozitivní). Se změnou kontaktní tuhosti souvisí i změna velikosti napětí. S nižší tuhostí se zvyšuje penetrace povrchů a prokluz povrchů. S vyšší tuhostí může dojít ke špatně podmíněné úloze a divergenci. Změnu FKN lze zadat přímo v předpisu kontaktu, změnu FKT pouze pomocí příkazu RMOD. Základní nastavení je předepsáno přes faktory, tzn. pro FKT je faktor 0 a pro FKN 10. V případě, že je v úloze i jiný kontakt než *bonded*, je FKN 1.

Všechny výstupy z výpočtového modelu lisování lze přímo implementovat do modelu vytlačovací zkoušky kromě průměrného tlaku. Proto byla snaha naladit velikost FKN a FKT u kontaktu *bonded* na základě průměrného kontaktního tlaku. Na základě citlivostní analýzy vytvořené v softwaru Optislang (popis analýzy viz příloha C) bylo zjištěno, že změna FKN a FKT má minimální vliv na výslednou hodnotu napětí ve svaru viz *obr. 15.3*. Jelikož tedy tuhostí kontaktu nelze ovlivnit výsledné napětí, bylo spojení ve výsledném výpočtovém modelu vytvořeno na úrovni sítě.



obr. 15.3 Výstup z citlivostní analýzy pro přístup tvarových napětí
 procentuální hodnota u *L*, *W* a *FKN* značí vliv na napětí ve svaru; procentuální hodnota u napětí značí, jak spolehlivě byla analýza provedena; vliv *FKT* z analýzy automaticky vypadl z důvodu nulového vlivu.

15.4.2 Modelování styku zkušební těleso – přípravek

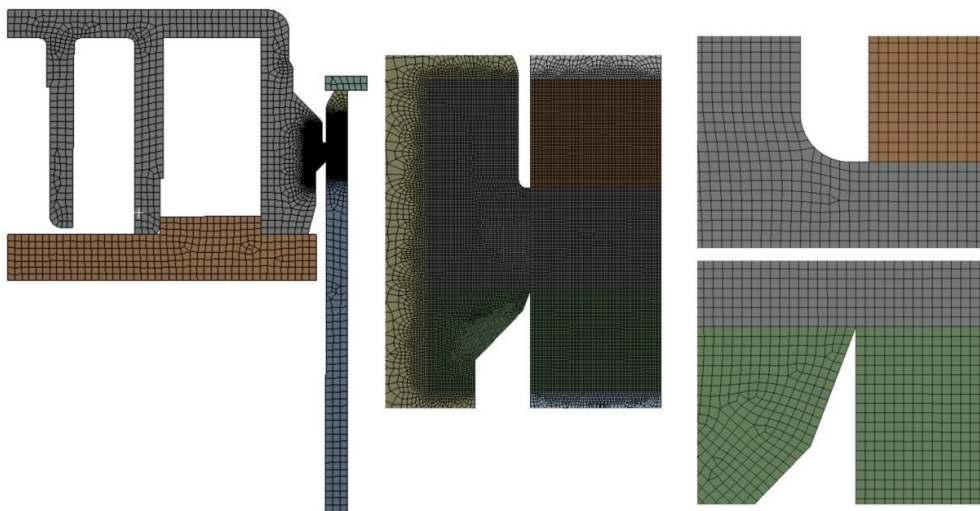
Styk rozhraní zkušební těleso – přípravek byl modelován kontaktem *frictional*. Ten byl aplikován mezi všechny hrany, u kterých došlo ke styku. Byla vybrána formulace *Normal Lagrange* s hodnotou součinitele tření 0.2. Ostatní nastavení zůstala beze změny.

Poznámka k nastavení kontaktu: Výpočty ukázaly, že typ formulace nemá vliv na výsledné hodnoty napětí. Podle [2] je velikost součinitele tření mezi ocelí a termoplastem v rozmezí 0.2 až 0.5. Z výpočtů vyplynulo, že v tomto intervalu se hodnoty výsledného napětí neměnily. Pod hodnotou 0.2 bylo výsledné napětí až o 38 % vyšší ($f=0$). Byl vytvořen předpoklad, že tření mezi tělesem a přípravkem je nenulové a vyšší než 0.2.

15.5 Model sítě konečných prvků

15.5.1 Tvarové napětí

Ukázka sítě je na *obr. 15.4*. Prvky v okolí svarové oblasti mají velikost 0.02 mm (funkce „face sizing“). Ostatní oblasti jsou tvořeny prvky o velikosti 0.5 mm. Počet a typ prvků pro typ NOM je v *tab. 15.2*. Modely MIN a MAX se liší přibližně o ± 200 prvků.



obr. 15.4 Model sítě pro metodu tvarových napětí

tab. 15.2 Počet a typ prvků pro metodu tvarových napětí

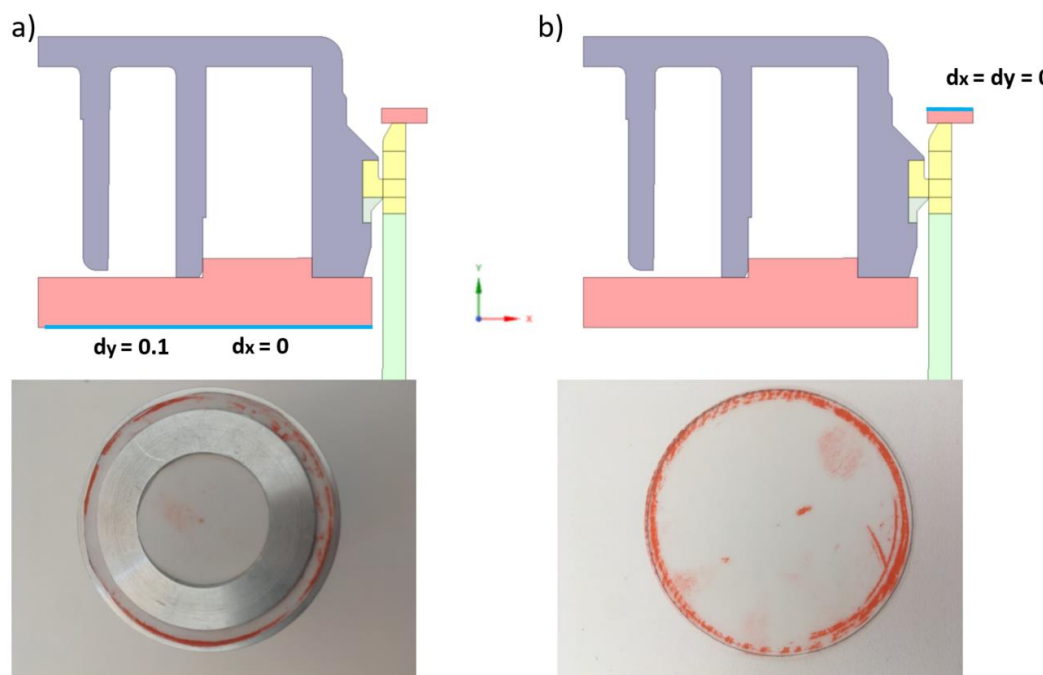
Typ prvku	PLANE183	CONTA172	TARGE169	Prvků celkem
Počet prvků	30776	297	297	31370

15.5.2 Kvalita sítě

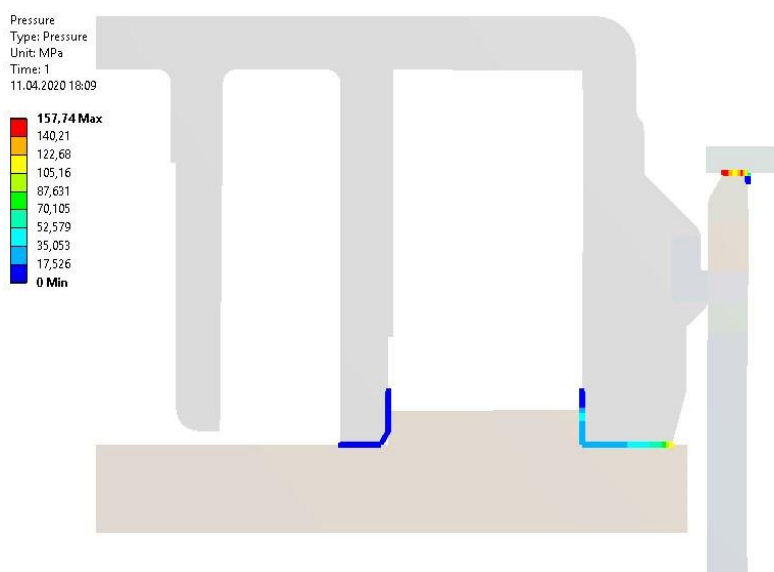
Kvalita sítě byla posouzena na základě *aspect ratio*. Model sítě vykazoval velikost *aspect ratio* 2.27. Při větším zjemnění sítě nedošlo ke změnám v hodnotách pozorovaných veličin. Model sítě lze hodnotit jako dostatečný.

15.6 Model okrajových podmínek

Okrajové podmínky opět vycházejí z experimentálního měření a měření pomocí tlakových fólií (viz *obr. 15.5*). Všechny modely byly zatíženy deformačně v ose y posuvem 0.1 mm. Shodu v OP s výsledky z měření pomocí TF lze ověřit pomocí vykreslení kontaktního tlaku mezi zkušebním tělesem a přípravkem (*obr. 15.6*). Z obrázku vyplývá, že hlavní přenos zatížení je ve stejných oblastech jako vykazovaly TF.



obr. 15.5 OP na základě tlakových fólií
modré úsečky označují místo aplikace OP



obr. 15.6 Vykreslení kontaktního tlaku mezi zkušebním tělesem a přípravkem

15.7 Nastavení řešiče

Celý výpočet proběhl v jednom *loadstepu* rozděleném na 50 *substepů*. Z předběžných výpočtů vyplynulo, že rozdíly mezi řešičem s velkými deformacemi (*large deflection*) a bez nich jsou minimální (1%). Jelikož nebyl problém s konvergencí úlohy, byl vybrán řešič s *large deflection*. Ostatní nastavení zůstala beze změny (programová nastavení).

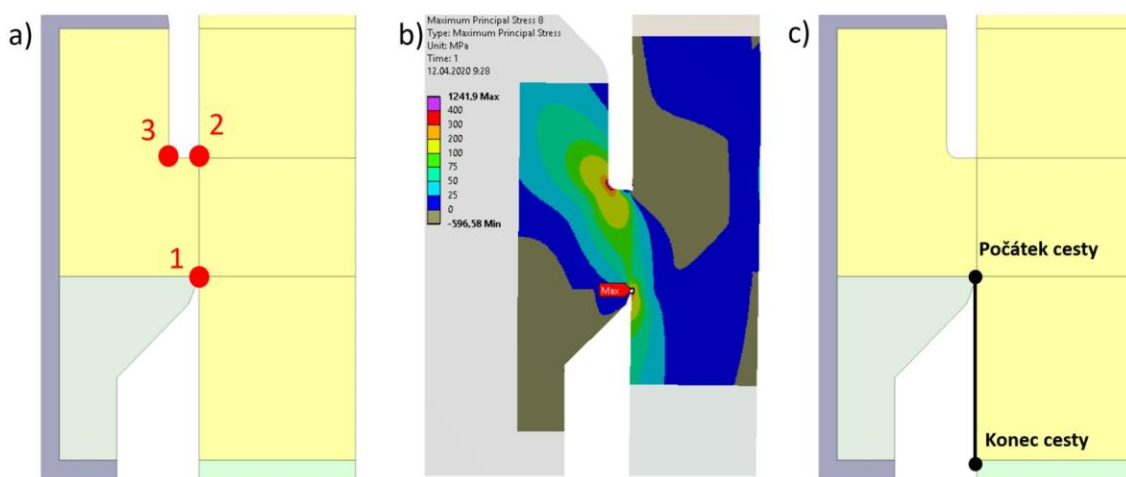
16 PREZENTACE VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ – VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

16.1 Postup zpracování výsledků

Pro vyhodnocení napjatosti ve svaru byla použita metoda tvarových napětí. Ta extrapoluje napětí ve vrubu (svaru) pomocí rovnic uvedených v *kap.5.8.2*. V práci byla využita kvadratická extrapolace závislá na tloušťce tělesa (rovnice 16.1). Tloušťka tělesa (tubusu) je 1.5 mm.

$$\sigma_{ex} = 2.52 \cdot \sigma_{0.4t} - 2.24 \cdot \sigma_{0.9t} + 0.72 \cdot \sigma_{1.4t} \quad (16.1)$$

Celá soustava má 3 kritická místa (viz *obr. 16.1a*). Místo 3 bylo vyloučeno na základě předpokladů a závěrů z *kap. 10.1.5*. Z výsledného rozložení napětí bylo vyhodnoceno jako **nejvíce kritické místo 1** (*obr. 16.1b*). Z obrázku lze na základě rozložení prvního hlavního napětí (resp. toku napětí) částečně určit směr šíření trhliny.



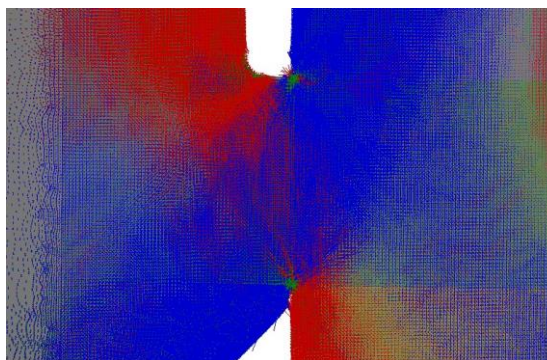
obr. 16.1 Vyhodnocení výsledků – model vytlačovací zkoušky

a) kritická místa b) rozložení prvního hlavního napětí c) cesta pro vyhodnocení napětí

Výstupem z této analýzy je průběh prvního hlavního napětí (dále jen napětí) po cestě (délka 3 mm) s počátkem v místě 1, viz *obr. 16.1c*. Průběh je získán ze *substepu*, při kterém reakční síla F_y od deformačního posuvu dosáhla mediánové limitní hodnoty získané z experimentálního měření (viz *tab. 10.2*). Datový soubor poloha - napětí je dále zpracován v Matlabu. Zde je soubor převzorkován tak, aby bylo možné získat přesné hodnoty odpovídající napětím z rovnice (16.1). Skript z Matlabu pro převzorkování a vyhodnocení tvarového napětí je v příloze E.

Poznámka k výběru typu napětí: První hlavní napětí bylo pro analýzu vybráno z několika důvodů.

- 1) Dosahuje nejvyšších hodnot na vyšetřované cestě
- 2) Tvarová napětí eliminují koncentraci napětí, tzn. i trojosou napjatost a není proto důvod vyhodnocovat redukované napětí
- 3) Při vykreslení vektorové orientace hlavních napětí je první hlavní napětí ve vyšetřované oblasti dominantní (*obr. 16.2*)



obr. 16.2 Vektorové zobrazení hlavních napětí

červená – první hlavní napětí; zelená – druhé hlavní napětí; modrá – třetí hlavní napětí

16.2 Presentace výsledků

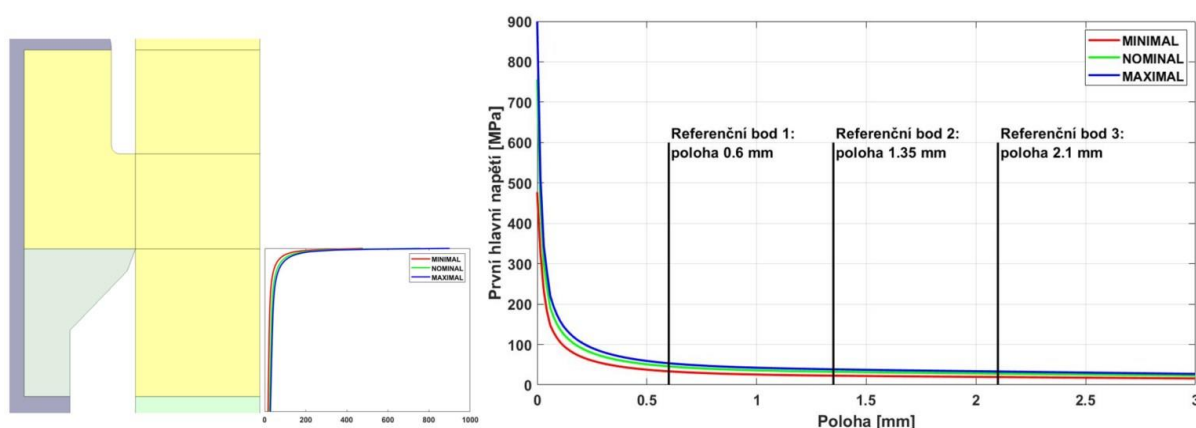
Porovnání hodnoty reakční síly, pro kterou bylo vyhodnoceno napětí, s experimentální hodnotou vytlačovací síly z tab. 10.2 je v tab. 16.1.

tab. 16.1 Srovnání reakční síly

Typ modelu	MIN	NOM	MAX
Reakční síla [N]	8 847	11 725	13 320
Vytlačovací síla [N]	8 850	11 790	13 300
Relativní chyba [%]	0.03	0.55	0.15

Poznámka k reakční síle: Reakční síla z tab. 16.1 přiřazená jednotlivým výpočtovým modelům, odpovídala vždy jiné hodnotě posuvu přípravku v ose y. Konkrétně 0.044 mm pro MIN, 0.061 mm pro NOM a 0.075 pro MAX. Z kap.10.3 vyplývá, že deformace na základě posuvu příčnicku je zkreslena, a není proto možné validovat výpočtový model na základě deformace.

Průběhy napětí pro jednotlivé výpočtové modely jsou na obr. 16.3.



obr. 16.3 Průběhy prvního hlavního napětí pod kritickým místem 1

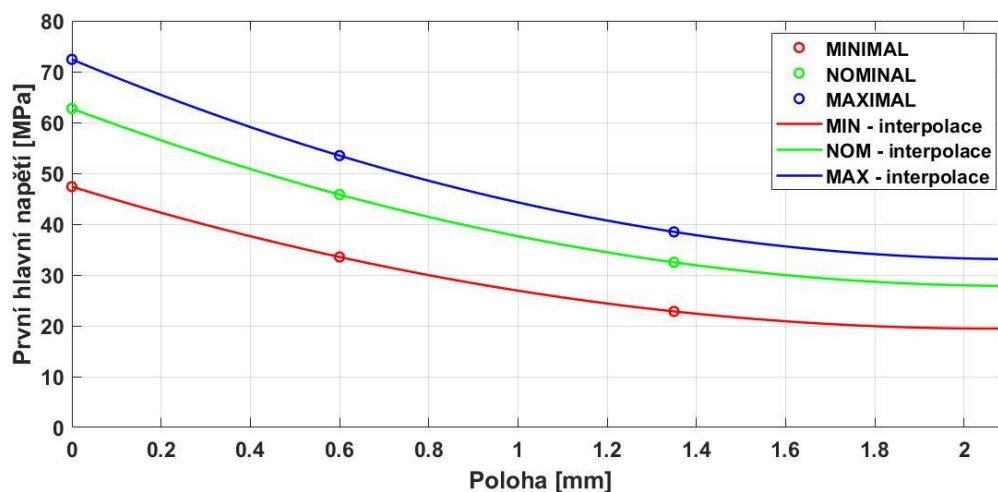
vlevo: ukázka průběhu napětí na tělese; vpravo: zobrazení referenčních bodů

Konkrétní hodnoty tvarových (extrapolovaných) napětí jsou v tab. 16.2.

tab. 16.2 Tvarová napětí

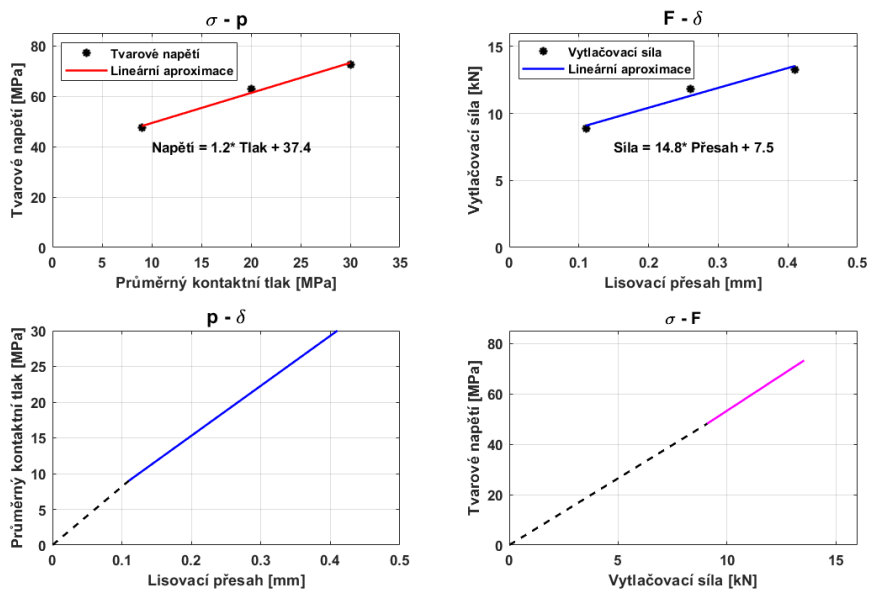
Typ modelu	MIN	NOM	MAX
Tvarové napětí [MPa]	47.4	62.75	72.4

Interpolované průběhy pro tvarová napětí jsou na obr. 16.4.



obr. 16.4 Interpolace průběhu napětí pod svarem

Následně byly vykresleny závislosti tvarové napětí – průměrný kontaktní tlak, vytlačovací síla (experiment) – lisovací přesah, průměrný kontaktní tlak – lisovací přesah a tvarové napětí – vytlačovací síla (viz obr. 16.5)



obr. 16.5 Zleva a shora: tvarové napětí – kontaktní tlak; vytlačovací síla – přesah; kontaktní tlak – přesah; tvarové napětí – vytlačovací síla

17 ANALÝZA VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ – VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

17.1 Analýza dosažených výsledků

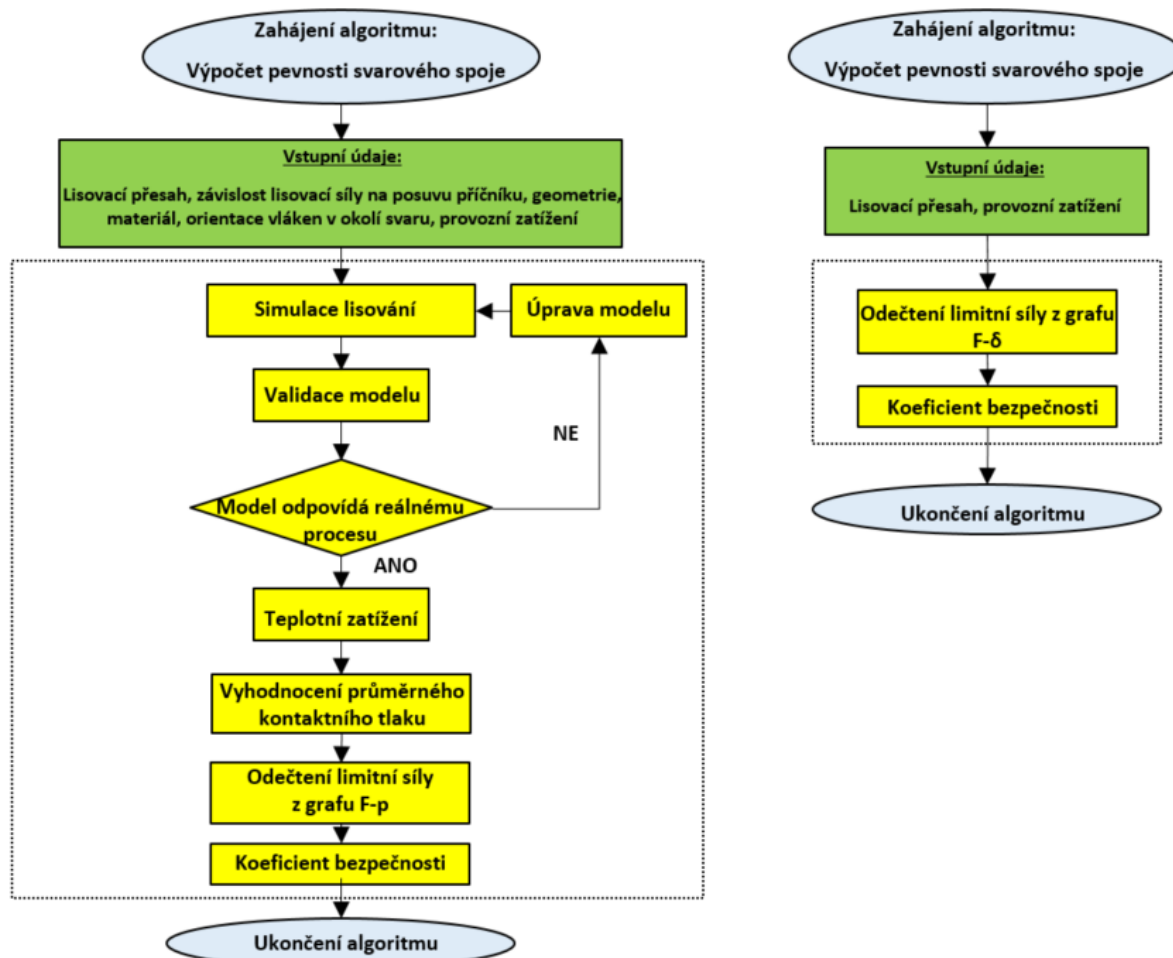
Na základě *tab. 16.1* lze tvrdit, že reakční síla odpovídá mediánové hodnotě vytlačovací síly (dále jen síla) z experimentu. Předpoklad tedy je, že vyhodnocované tvarové napětí (dále jen napětí) odpovídá stavu při lomu součásti. Hodnoty napětí z *tab. 16.2* potvrzují závěr z *kap.10.3*, že pevnost svaru se zvyšuje s rostoucím přesahem.

Jediná veličina, která nebyla implementována ve výpočtovém modelu, je průměrný kontaktní tlak (dále jen tlak) z výpočtového modelu lisování. Z *obr. 16.5* vyplývá, že závislost mezi napětím a tlakem je lineární stejně jako závislost mezi silou a tlakem. Lineární je také závislost mezi silou a přesahem a závislost mezi tlakem a přesahem.

V *obr. 16.5* jsou zároveň zobrazeny rovnice odpovídajících aproximovaných přímk. Při relativním přepočtu os na stejné jednotky se získají totožné parametry přímk k a q . Proto lze tvrdit, že tvarové napětí z *tab. 16.2* je přímo úměrné mediánové hodnotě kritické vytlačovací síly z experimentálního měření. Stejně tak průměrný kontaktní tlak je přímo úměrný lisovacímu přesahu.

17.2 Metoda hodnocení statické pevnosti svarového spoje nekovových materiálů

Na základě *kap. 17.1* jsou vytvořeny dvě metody pro hodnocení statické pevnosti svarového spoje, který byl vytvořen metodou LTW. První metoda byla vytvořena na základě kontaktního tlaku a využívá výpočtové modelování (algoritmus je na *obr. 17.1 vlevo*). Druhá metoda byla vytvořena na základě znalosti lisovacího přesahu a využívá pouze výsledky z experimentu (*obr. 17.1 vpravo*).



*obr. 17.1 Algoritmy metod pro hodnocení statické pevnosti svarového spoje
vlevo: přístup kontaktního tlaku; vpravo: přístup lisovacího přesahu*

17.2.1 Podmínky použití metod

Podmínky aplikace metod jsou:

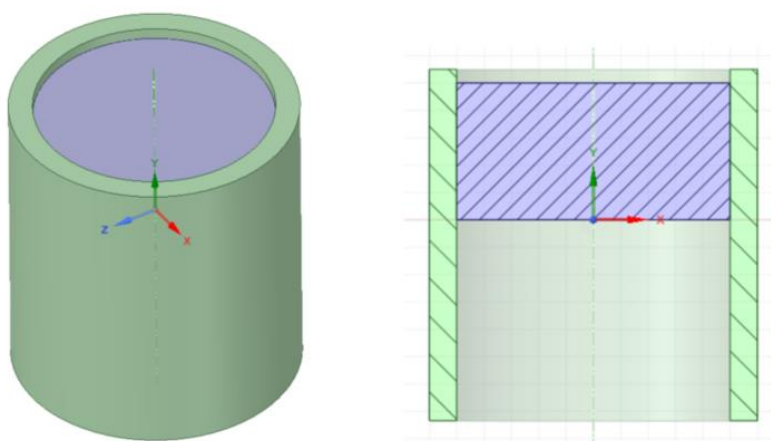
- 1) V procesu výroby dochází k lisování a následnému svařování metodou LTW
- 2) Materiál svařovaných součástí je Grivory HTV 4H1 nebo Grivory HTV 4X1 (totožné)
- 3) Teplotně závislé materiálové charakteristiky jsou z *tab. 12.1* (pouze přístup kont. tlaku)
- 4) Lisovací přesah je v intervalu $<0.11;0.41>$ mm

17.2.2 Ověření aplikovatelnosti metod

Tato práce byla velmi ovlivněna imperfekcemi zkušebního tělíska (viz *kap. 6.1*). Zároveň jsou obě metody postaveny na dvou předpokladech:

- 1) K iniciaci a šíření trhliny při vytlačovací zkoušce došlo ve svaru.
- 2) Zbytkový materiál dělicí roviny (otřep) odteče po natavení laserem mimo svarovou oblast.

Je tedy třeba ověřit jejich aplikovatelnost na jiném zkušebním tělese, u kterého budou eliminovány výše uvedené skutečnosti. Návrh takového tělesa je na *obr. 17.2*. Toto těleso je rotačně symetrické a bez tvarových prvků v blízkosti svarové oblasti.



*obr. 17.2 Návrh zkušebního tělesa na ověření aplikovatelnosti metody
vlevo: 3D model; vpravo: řez rovinou x-y*

18 IMPLEMENTACE VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ

18.1 Implementace výsledků experimentálního modelování

Nejdůležitější výstupy z experimentálního modelování jsou:

- 1) S rostoucím lisovacím přesahem roste pevnost svarového spoje (v testovaném rozsahu).
- 2) Nejnížší mediánová odchylka je pro přesah 0.26 (NOM). S rostoucím přesahem odchylka významně narůstá. S klesajícím přesahem je nárůst nevýznamný.
- 3) Lisovací přesah nemá vliv na těsnost svarového spoje (v testovaném rozsahu).

Výše uvedené výstupy lze aplikovat do výroby produktů za těchto podmínek:

- 1) v procesu výroby dochází k lisování a následnému svařování metodou LTW.
- 2) svařované součásti jsou vyrobeny z materiálu Grivory HTV 4H1 nebo Grivory HTV 4X1

V případě, že výrobky splňují uvedené podmínky, se doporučuje:

- a) Lisovat součásti s přesahem v rozsahu $<0.11; 0.26>$ mm u výrobků, u kterých nedochází k porušení soudržnosti svaru při provozní zátěži. Je tak zaručena nízká odchylka (rozptyl) vlastností svarového spoje a tím vyšší výrobní stabilita výrobku. Zároveň je zaručena těsnost spoje. Na základě *kap. 5.6.1* lze tento postup doporučit i v případě, že k porušení soudržnosti svaru dochází v oblasti nízkocyklové nebo vysokocyklové únavy.
- b) Lisovat s maximálním přesahem (0.41 mm) u výrobků, u kterých dochází k porušení soudržnosti svarového spoje při provozní zátěži (musí se jednat o statické zatěžování). Je tak zaručena maximální pevnost svarového spoje při statickém zatěžování.

18.2 Implementace výsledků výpočtového modelování

Hlavní výstup z části práce zabývající se výpočtovým modelováním jsou metody popsané v *kap.17.2*. Metody mají v praxi využití v případě, že je požadavkem určení koeficientu bezpečnosti pro statické zatěžování. Je však důležité, aby byly splněny podmínky použití popsané v *kap.17.2.1*. Je možné použít jak metodu kontaktního tlaku, tak metodu lisovacího přesahu. Obě jsou ekvivalentní. Z hlediska náročnosti použití je jednodušší a rychlejší použít metodu lisovacího přesahu. Tímto přístupem lze pouze na základě lisovacího přesahu provozního zatížení navrhnout svarový spoj. Pokud se při ověření na jiném zkušebním tělísku viz *obr. 17.2*, zjistí, že kontaktní tlak není přímo úměrný lisovacímu přesahu a tvarové napětí není přímo úměrné vytlačovací síle, je jistější využít přístup přes kontaktní tlak.

18.3 Náměty k další práci

V následujících letech bude zahrnutí LTW svařování ve výrobě dále častější. Proto jsou navrženy tyto náměty k další práci:

- Testování svaru na cyklické zatížení a zatížení vysokoteplotním *creepem*.
- Rozšířit databázi materiálů, pro kterou jsou použitelné metody popsané v *kap. 17.2*.
- Verifikovat metody z *kap. 17.2* na jiných typech svaru.

19 ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce se zabývá vlivem lisovacího přesahu na statickou pevnost a těsnost svarového spoje kompozitní součásti. Svar byl vytvořen metodou laserového transmisivního svařování (LTW).

V práci bylo formulováno 5 základních cílů. Závěry vytvořené pro jednotlivé cíle jsou uvedeny v následujícím přehledu.

1. Rešeršní studie svařování nekovových materiálů a přístupů k hodnocení pevnosti svařovaných součástí

Svařování nekovových materiálů je výrazně novější obor než svařování kovů, a proto je literatury tímto se zabývajících naprosté minimum. V práci byla provedena rozsáhlá rešeršní studie z oblasti řešené problematiky. Hlavním závěrem je, že žádná z dostupných studií se nezabývala vlivem lisovacího přesahu na pevnost svaru. Vždy se jednalo pouze o přidržovací tlak. Dále z rešerše vyplynulo, že není veřejně dostupná metoda nebo doporučení jak experimentálně nebo výpočtově hodnotit pevnost svaru. Proto byl vytvořen výčet přístupů k hodnocení pevnosti svaru kovových součástí. Z něj byla jako jediná aplikovatelná metoda na řešenou problematiku vybrána metoda tvarových napětí.

2. Experimentální modelování vlivu přesahu na statickou pevnost a těsnost svarového spoje

V práci byl navržen experiment na testování těsnosti a statické pevnosti svarového spoje vytvořeného metodou LTW. Bylo využito již dříve používaného zkušebního tělíska, na kterém se ladily parametry svařovacího procesu. Tělísko se skládalo ze dvou částí víka a tubusu. Víko bylo nejprve nalisováno do tubusu a následně svařeno. Testován byl lisovací přesah 0.11, 0.26 a 0.41 mm. V rámci experimentu bylo použito výpočtového modelování pro výběr optimálního zkušebního přípravku. Z navržených metod bylo vybráno tzv. vytlačování. To znamená, že je víko vytlačováno z tubusu. Kvalita svarového spoje byla hodnocena na základě mikrotomové analýzy. Zároveň byly po každém dílčím procesu v rámci experimentu změřeny všechny podstatné rozměry a vyhodnoceny nejistoty měření. Dále byly výsledky statisticky zpracovány a analyzovány.

3. Vytvoření výpočtového modelu pro hodnocení statické pevnosti svarového spoje

V rámci práce byl vytvořen výpočtový model sestávající z kombinace modelu lisovacího procesu a vytlačovacího procesu. Výpočtový model byl vytvořen pro všechny tři testované přesahy.

Důležité je zmínit tvorbu dílčích modelů. S modelem geometrie vytvořeným pouze na základě výkresové dokumentace nebylo možné docílit shody mezi experimentem a simulací. Proto bylo nutné přeměřit podstatné rozměry. Model materiálu byl vytvořen na základě vytvořené moldflow analýzy a ortotropních materiálových charakteristik. Materiál byl tedy modelován jako ortotropní lineárně elastický a po oblastech nehomogenní (jiná orientace skelných vláken). V rámci modelu lisování byla částečně zahrnuta změna materiálových

vlastností na teplotě. Model okrajových podmínek byl vytvořen na základě tlakových fólií. Zatížení kopírovalo experimentální měření. Model styku těles byl modelován jako kontakt se třením.

Lisovací proces byl validován na základě experimentálních dat. Z modelu lisování byl vyhodnocen průměrný kontaktní tlak ve svarové oblasti a šířka kontaktní plochy. Šířka kontaktní plochy byla použita jako vstupní parametr do modelu vytlačování. Byly tak vytvořeny tři rozdílné modely. Rozdílnost ve velikosti průměrného kontaktního tlaku nebylo možné do modelu zahrnout. Vyhodnocováno bylo první hlavní napětí ve svaru metodou tvarových napětí. Výsledná tvarová napětí byla následně vykreslena v závislosti na průměrném kontaktním tlaku.

Součástí modelu vytlačování byla i citlivostní analýza vstupních parametrů na výsledné napětí ve svaru. V rámci tvorby výpočtového modelu byl vytvořen příkaz v jazyce APDL pro vyčíslení a vykreslení kontaktního tlaku po cestě, což Ansys Workbench neumožňuje, a skript v programu Matlab pro převzorkování a vyhodnocení tvarového napětí.

4. Analýza výsledků

V rámci práce byla vytvořena analýza výsledků jak experimentálního, tak výpočtového modelování. Zde je vytvořeno shrnutí nejdůležitějších výsledků práce.

Experimentální modelování

- Pevnost svarového spoje se lineárně zvyšuje s rostoucí velikostí lisovacího přesahu
- Odchýlení hodnot pevnosti od mediánové hodnoty je nejnižší u přesahu 0.26 mm a významně se zvyšuje s rostoucím přesahem a nevýznamně s klesajícím.
- Lisovací přesah nemá vliv na těsnost svarového spoje

Výpočtové modelování

- Tvarové napětí je přímo úměrné mediánu maximální vytlačovací síly
- Průměrný kontaktní tlak je přímo úměrný lisovacímu přesahu

Na základě výše uvedených výsledků byla vytvořena doporučení pro lisování ve výrobě na základě provozního zatížení. Dále byly vytvořeny dvě metody pro hodnocení pevnosti svarového spoje vytvořeného metodou LTW na základě lisovacího přesahu. První metoda využívá kombinaci experimentálního a výpočtového modelování a druhou lze použít pouze na základě znalosti lisovacího přesahu a provozního zatížení. Z toho důvodu je mnohem jednodušší použít druhý algoritmus. Zejména v raném stádiu návrhu svarového spoje lze totiž odhadnout pevnost svaru pouze na základě přesahu. Součástí jsou i podmínky použití metody.

Je nutné zdůraznit, že použité zkušební tělísko má tři negativa: není rotačně symetrické, dělicí rovina je ve svarové oblasti a v blízkosti svarové oblasti je vrub. Poloha dělicí roviny ovlivňuje velikost kontaktního tlaku ve výpočtovém modelu a z důvodu přítomnosti vrubu nebylo možné určit, zdali došlo k iniciaci a šíření trhliny ve svaru nebo ve vrubu. Proto byly vytvořeny dva předpoklady, na kterých stojí dosažené výsledky. Předpoklady jsou: zbytkový

materiál dělicí roviny odteče v podobě strusky při svařování; k iniciaci a šíření trhliny došlo ve svaru.

5. Diskuze nad možnostmi predikce pevnosti svarových spojů pomocí výpočtového modelování

Součástí práce bylo i vytvoření metody pro hodnocení pevnosti svarového spoje pomocí výpočtového modelování, jak bylo uvedeno v bodu 4. Použití této metody s algoritmem využívajícím výpočtové modelování je ale zbytečně časově a finančně náročné. Vše lze hodnotit pouze na základě vstupních údajů (lisovací přesah a provozní zatížení).

V závěrečné části práce byly vytvořeny náměty na další pokračování v tématu. Dále byl z důvodu již několikrát zmíněných předpokladů vytvořen návrh verifikace vytvořených metod.

Závěrem lze konstatovat, že všechny formulované cíle na počátku práce byly v plném rozsahu splněny.

20 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Plastics in the Automotive Industry – Which Materials Will Be the Winners and Losers?* [online]. 31.1.2019 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://www.gpca.org.ae/2019/01/31/plastics-in-the-automotive-industry-which-materials-will-be-the-winners-and-losers/>
- [2] *What determines friction between thermoplastic components* [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.hardiepolymers.com/knowledge/what-determines-friction-between-thermoplastic-components/>
- [3] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno, 2008.
- [4] SVORČÍK, V. *Struktura a vlastnosti polymerů* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: www.fs.cvut.cz
- [5] *Polymerní materiály: Přednášky k předmětu BUM* [online]. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: www.ime.fme.vutbr
- [6] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [7] YOUSEFPOUR, Ali. *Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites* [online]. , 39 [cit. 2020-02-15]. DOI: 10.1177/0892705704045187.
- [8] MAYBOUDI, Layla S. *Heat transfer modelling and thermal imaging experiments in laser transmission welding of thermoplastics*. Ontario, Canada, 2008. Dizertační práce. Queen's University.
- [9] IWANOWSKI, Ireneusz. *LASER TRANSMISSION WELDING USING CARBON FIBER REINFORCED POLYMERS* [online]. [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.inventionstore.de>
- [10] KUTZ, Myer. *APPLIED PLASTICS ENGINEERING HANDBOOK* [online]. 2017. [cit. 2020-02-19]. ISBN 978-0-323-39040-8.
- [11] *Confluence of Multidisciplinary Sciences for Polymer Joining* [online]. Springer, 2019 [cit. 2020-02-15]. ISBN 978-981-13-0626-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0626-6>
- [12] CASALINO, G. a E. GHORBEL. *Numerical model of CO2 laser welding of thermoplastic polymers* [online]. 2007 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: www.elsevier.com
- [13] SEKANINA, Vladislav. *Studium pevnosti svařovaných spojů*. Zlín, 2018. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [14] VAN DE VEN, J. D. a A. G. ERDMAN. Laser Transmission Welding of Thermoplastics—Part II: Experimental Model Validation. *Journal of manufacturing science and engineering*. **2007**(129). DOI: DOI: 10.1115/1.2752832.
- [15] ACHERJEE, Bappa. Experimental investigation on laser transmission welding of PMMA to ABS via response surface modeling. *Optics and laser technology* [online]. 2011 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2011.12.029.
- [16] ACHERJEE, Bappa. *Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology* [online]. 2009 [cit. 2020-02-18].
- [17] VAN DER STRAETEN, Kira. *Laser transmission welding of long glass fiber reinforced thermoplastics* [online]. 2015 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.1117/12.2079566.
- [18] DABIRY, Y. *An Experimental Study on the Tensile Behaviors of Ultrasonic Welded T-joints for Polyamide Composite* [online]. 2016 [cit. 2020-02-18].
- [19] ONKEN, J. a C. HOPMANN. *Prediction of weld line strength in injection-moulded parts made of unreinforced amorphous thermoplastics* [online]. [cit. 2020-02-18].
- [20] TSANG, K. Y. *Fatigue properties of vibration-welded nylon 6 and nylon 66 reinforced with glass fibres* [online]. 2007 [cit. 2020-02-18].
- [21] VOTRUBEC, V. Fatigue Strength of Laser Welded Joints of PP and PC Components. *World journal of mechanics* [online]. 2018 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.4236/wjm.2018.86017.
- [22] RŮŽIČKA, Milan. *Únavové křivky a faktory, které je ovlivňují* [online]. [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: http://www.kmp.tul.cz/system/files/duz_2017_2_ru.pdf
- [23] WEI, P. S. *Nugget shape control in resistance spot welding* [online]. 2013 [cit. 2020-02-21]. DOI: 10.1109/IMPACT.2013.6706640. Dostupné z: www.researchgate.net
- [24] PEC, Michal, Rozbor únosnosti vybraných svarovaných konstrukčních uzlu zatežovaných staticky a cyklicky: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2015. 111 s. Vedoucí práce Ing. Petr Vosynek.
- [25] JURENKA, Josef. *Hodnocení únavové odolnosti svařovaných konstrukcí* [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/weld_fatigue_2014_dpz.pdf

- [26] HOBACHER, A. F. *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components* [online]. Second edition. Springer International Publishing Switzerland, 2016 [cit. 2020-04-12]. ISBN 978-3-319-23757-2.
- [27] JANÍČEK, Přemysl. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: Hledání souvislostí*. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-554-9.
- [28] [Www.campusplastics.com](http://www.campusplastics.com) [online]. [cit. 2020-04-12].
- [29] [Www.engelglobal.com](http://www.engelglobal.com) [online]. [cit. 2020-04-12].
- [30] [Www.instron.us](http://www.instron.us) [online]. [cit. 2020-04-12].
- [31] [Www.proxxon.com](http://www.proxxon.com) [online]. [cit. 2020-04-12].
- [32] [Www8.hp.com](http://www8.hp.com) [online]. [cit. 2020-04-12].
- [33] [Www.keyence.com](http://www.keyence.com) [online]. [cit. 2020-04-12].
- [34] [Www.mitutoyo.cz](http://www.mitutoyo.cz) [online]. [cit. 2020-04-12].
- [35] [Www.terms.cz](http://www.terms.cz) [online]. [cit. 2020-04-12].
- [36] [Www.hexagonmi.com](http://www.hexagonmi.com) [online]. [cit. 2020-04-12].
- [37] [Www.Fujifilm.com](http://www.Fujifilm.com) [online]. [cit. 2020-04-12].
- [38] [Www.zeltwanger.de](http://www.zeltwanger.de) [online]. [cit. 2020-04-12].

21 SEZNAM TABULEK

tab. 5.1 Odhady meze únavy kovů [22]	27
tab. 7.1 Systém podstatných veličin pro experimentální modelování	37
tab. 7.2 Systém podstatných veličin pro výpočtové modelování	38
tab. 8.1 Použitý software	39
tab. 8.2 Použitá zařízení	40
tab. 9.1 Vybrané materiálové charakteristiky materiálu Grivory HTV 4H1	41
tab. 9.2 Ortotropní materiálová data	42
tab. 9.3 Jmenovité rozměry lisovacího průměru	42
tab. 9.4 Základní parametry vstřikovacího procesu	43
tab. 9.5 Velikost lisovacího průměru vika	44
tab. 9.6 Velikost vnitřního průměru tubusu	45
tab. 9.7 Lisovací přesah	47
tab. 9.8 Nastavení procesu lisování	48
tab. 9.9 Měřený rozměr po zalisování	48
tab. 9.10 Test normality Anderson Darling – výsledné p-hodnoty	50
tab. 9.11 Mediánové hodnoty lisovacích sil použité pro validaci výpočtového modelu	50
tab. 9.12 Základní procesní parametry LTW	51
tab. 9.13 Statistické charakteristiky průměrné svařovací teploty	51
tab. 10.1 Nastavení procesu vytlačování	54
tab. 10.2 Mediánové hodnoty	58
tab. 10.3 Rozšířená nejistota pro maximální vytlačovací sílu	59
tab. 10.4 Maximální vytlačovací síly se zahrnutím nejistot měření	59
tab. 11.1 Statistické charakteristiky tlaku	62
tab. 12.1 Teplotně závislé materiálové charakteristiky	69
tab. 12.2 Počet použitých prvků pro jednotlivé přístupy modelování	71
tab. 12.3 Deformační posuv tubusu	74
tab. 12.4 Rozdělení řešení přístupu 1	75
tab. 12.5 Rozdělení řešení přístupu 2	75
tab. 13.1 Porovnání specifických hodnot z průběhu lisování mezi experimentem a výpočtem	76

tab. 13.2 Srovnání radiálních deformací	77
tab. 14.1 Rozdily ve vybraných hodnotách mezi výpočty bez aplikace teploty a s aplikací	80
tab. 14.2 Vyhodnocená šířka svaru z mikrotomů	81
tab. 15.1 Vstupní veličiny do výpočtového modelu vytlačovací zkoušky	82
tab. 15.2 Počet a typ prvků pro metodu tvarových napětí	85
tab. 16.1 Srovnání reakční síly	88
tab. 16.2 Tvarová napětí	89
tab. 0.1 Směrodatné odchylky z měření průměru víka	104
tab. 0.2 Kombinovaná nejistota pro víko	104
tab. 0.3 Rozšířená nejistota pro víko	104
tab. 0.4 Směrodatné odchylky z měření tubusu	104
tab. 0.5 Kombinovaná nejistota pro tubus	105
tab. 0.6 Rozšířená nejistota pro tubus	105
tab. 0.7 Souhrn nejistot měření pro vytlačování	105
tab. 0.8 Počet prvků pro jednotlivé způsoby	107
tab. 0.9 Počet použitých prvků pro víko a tubus	113

22 SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 4.1 a) semikrystalická struktura; b) sférolit (převzato z [4])	16
obr. 4.2 Vlivy na mechanické vlastnosti termoplastů (převzato z [5])	17
obr. 5.1 Princip svařování termoplastů (převzato z [7])	18
obr. 5.2 Rozdělení svařovacích metod	19
obr. 5.3 Třetí mechanismus svařování (převzato z [7])	20
obr. 5.4 Metoda LTW (převzato z [9])	22
obr. 5.5 Techniky LTW [10]	22
obr. 5.6 Svar vytvořený metodou LTW	22
obr. 5.7 Rozdělení svaru na zóny na základě teplotního gradientu (převzato z [12])	22
obr. 5.8 Mikroskopický detail svarové oblasti (převzato z [7])	24
obr. 5.9 Závislost šířky (vlevo) a pevnosti (vpravo) svaru na přidržovacím tlaku (převzato z [14])	25
obr. 5.10 Vliv přidržovacího tlaku na pevnost svarového spoje	25
obr. 5.11 S-N křivka v závislosti na přidržovacím tlaku (převzato z [20])	26
obr. 5.12 Rozdílná struktura svarového spoje nekovových a kovových materiálů	28
obr. 5.13 Typická struktura svaru vzniklého odporovým svařováním [23]	28
obr. 5.14 Napětové přístupy posouzení svaru [25]	29
obr. 5.15 Tvarová napětí – rozdělení (převzato z [26])	31
obr. 5.16 Určení referenčních bodů (převzato z [26])	32
obr. 6.1 Typické zatížení pump v automobilu	33
obr. 6.2 Zkušební tělísko a jeho dekompozice	34
obr. 6.3 Postup řešení problému	35
obr. 9.1 Mechanické vlastnosti materiálu Grivory HTV 4H1 (převzato z [28])	41
obr. 9.2 Svařovací geometrie	43
obr. 9.3 Vstřikovací body pro víko (vlevo) a tubus (vpravo)	43
obr. 9.4 Měření lisovacího průměru víka	44
obr. 9.5 Ukázka měření vnitřního průměru rovné části tubusu	46
obr. 9.6 Grafické zobrazení kruhovitosti tubusu	46

<i>obr. 9.7</i> Znázornění přesahů	47
<i>obr. 9.8</i> Lisovací přípravek a proces	47
<i>obr. 9.9</i> Nepřímé měření hloubky zalisování	48
<i>obr. 9.10</i> Výstupy z lisování – reprezentativní případy	49
<i>obr. 9.11</i> Histogramy maximální lisovací síly	50
<i>obr. 9.12</i> Histogram průměrné svařovací teploty	51
<i>obr. 9.13</i> Příprava vzorků pro mikrotomovou analýzu	52
<i>obr. 9.14</i> Mikrotomové řezy	52
<i>obr. 10.1</i> Modely možných způsobů testování pevnosti svaru	53
<i>obr. 10.2</i> a) upravený vzorek b) díl přípravku A c) díl přípravku B	54
<i>obr. 10.3</i> Proces vytlačování	55
<i>obr. 10.4</i> Typické lomové plochy u tubusu	55
<i>obr. 10.5</i> Rozdělení vzorků na základě lomové plochy	56
<i>obr. 10.6</i> Porovnání závislosti vytlačovací síly na posuvu příčniku pro různý přesah	57
<i>obr. 10.7</i> Vlevo: histogramy s proložením normálního rozdělení; vpravo: distribuční funkce	57
<i>obr. 10.8</i> Výsledek testování	58
<i>obr. 10.9</i> Vytlačovací síla jako funkce přesahu	58
<i>obr. 10.10</i> Závislost pevnosti svaru na lisovacím přesahu	59
<i>obr. 11.1</i> Tlaková destrukční zkouška	61
<i>obr. 11.2</i> Záznam tlaku na čase	62
<i>obr. 12.1</i> Přístupy modelování lisovacího procesu (žlutá – víko; zelená – tubus)	63
<i>obr. 12.2</i> Podstatné rozměry – svařovaná oblast	64
<i>obr. 12.3</i> Snímky a měření pomocí světelného mikroskopu Keyence	65
<i>obr. 12.4</i> Snímky otřepu z mikroskopu	65
<i>obr. 12.5</i> Model geometrie tubusu	66
<i>obr. 12.6</i> Model geometrie víka	66
<i>obr. 12.7</i> Pravděpodobná orientace vláken ve svarové oblasti víka	68
<i>obr. 12.8</i> Pravděpodobná orientace vláken ve svarové oblasti tubusu	68
<i>obr. 12.9</i> Vytvoření lokálních souřadných systému na základě MFA	69
<i>obr. 12.10</i> Rozdělení na podoblasti z hlediska teplotní závislosti	70
<i>obr. 12.11</i> Aplikace kontaktu typu frictional	70
<i>obr. 12.12</i> Nastavení kontaktu FRICTIONAL	71
<i>obr. 12.13</i> Síť konečných prvků – a) přístup 1 b) přístup 2	72
<i>obr. 12.14</i> Aplikace TF pro lisování	73
<i>obr. 12.15</i> Aplikace přístupu 1	74
<i>obr. 12.16</i> Aplikace přístupu 2	75
<i>obr. 13.1</i> Reakční síla v ose y	76
<i>obr. 13.2</i> Srovnání rozložení kontaktního tlaku	78
<i>obr. 13.3</i> Ověření věrohodnosti výsledků	78
<i>obr. 14.1</i> Rozložení kontaktního tlaku	79
<i>obr. 14.2</i> Rozložení kontaktního tlaku po aplikaci teploty	80
<i>obr. 14.3</i> Ukázka měření šířky svaru z mikrotomových řezů	81
<i>obr. 14.4</i> Závislost šířky svaru na lisovacím přesahu	81
<i>obr. 15.1</i> Model geometrie pro metodu tvarových napětí	83
<i>obr. 15.2</i> Lokální souřadné systémy	83
<i>obr. 15.3</i> Výstup z citlivostní analýzy pro přístup tvarových napětí	84
<i>obr. 15.4</i> Model sítě pro metodu tvarových napětí	85

<i>obr. 15.5 OP na základě tlakových fólií</i>	86
<i>obr. 15.6 Vykreslení kontaktního tlaku mezi zkušebním tělesem a přípravkem</i>	86
<i>obr. 16.1 Vyhodnocení výsledků – model vytlačovací zkoušky</i>	87
<i>obr. 16.2 Vektorové zobrazení hlavních napětí</i>	88
<i>obr. 16.3 Průběhy prvního hlavního napětí pod kritickým místem 1</i>	88
<i>obr. 16.4 Interpolace průběhu napětí pod svarem</i>	89
<i>obr. 16.5 Zleva a shora: tvarové napětí – kontaktní tlak; vytlačovací síla – přesah; kontaktní tlak – přesah; tvarové napětí – vytlačovací síla</i>	89
<i>obr. 17.1 Algoritmus metody pro hodnocení statické pevnosti svarového spoje</i>	91
<i>obr. 17.2 Návrh zkušebního tělesa na ověření aplikovatelnosti metody</i>	92
<i>obr. 0.1 Vstříkolis Engel [29]</i>	102
<i>obr. 0.2 Instron [30]</i>	102
<i>obr. 0.3 Pásová pila Proxxon [31]</i>	102
<i>obr. 0.4 HP ZBook [32]</i>	102
<i>obr. 0.5 Světelný mikroskop Keyence [33]</i>	102
<i>obr. 0.6 Posuvné měřítko Mitutoyo [34]</i>	103
<i>obr. 0.7 TERMS [35]</i>	103
<i>obr. 0.8 Hexagon DEA Classic [36]</i>	103
<i>obr. 0.9 Tlakové fólie [37]</i>	103
<i>obr. 0.10 Laser Zeltwanger [38]</i>	103
<i>obr. 0.11 Záznam lisovací síly</i>	106
<i>obr. 0.12 Mikrotomové řezy vzorek č. 2</i>	106
<i>obr. 0.13 a) Model geometrie svaru b) Model sítě</i>	107
<i>obr. 0.14 Rozložení prvního hlavního napětí pro jednotlivé způsoby statické zkoušky</i>	107
<i>obr. 0.15 Záznam vytlačovací síly</i>	108
<i>obr. 0.16 Vliv dimenze úlohy na reakční sílu</i>	109
<i>obr. 0.17 Zbylé snímky z mikroskopu Keyence</i>	109
<i>obr. 0.18 Vliv modelu materiálu (vlevo – reakční síla; vpravo – kontaktní tlak)</i>	110
<i>obr. 0.19 Vliv formulace kontaktu (vlevo – reakční síla; vpravo – kontaktní tlak)</i>	110
<i>obr. 0.20 Vliv součinitele tření (vlevo – reakční síla; vpravo – kontaktní tlak)</i>	111
<i>obr. 0.21 Vliv přidržovací síly na rozložení kontaktního tlaku</i>	111
<i>obr. 0.22 Použitý příkaz pro zajištění OP (zákaz posuvu) od koncové pozice předcházejícího kroku</i>	111
<i>obr. 0.23 Vliv otřepu (vlevo – reakční síla; vpravo – kontaktní tlak)</i>	112
<i>obr. 0.24 Rozdíl v přístupech pro vyhodnocení kontaktního tlaku</i>	112
<i>obr. 0.25 Příkaz pro vyhodnocení kontaktního tlaku po cestě v Ansys Workbench</i>	112
<i>obr. 0.26 Použitá síť v MFA a) víko b) tubus</i>	113
<i>obr. 0.27 Procesní parametry pro MFA a) víko b) tubus</i>	114
<i>obr. 0.28 Nastavení řešiče pro MFA</i>	114

23 SEZNAM PŘÍLOH

A – PARAMETRY STROJŮ A ZAŘÍZENÍ	102
B – DODATEK K EXPERIMENTÁLNÍMU MODELOVÁNÍ	104
C – DODATEK K VÝPOČTOVÉMU MODELOVÁNÍ	109
D – MOLDFLOW ANALÝZA	113
E – VYHODNOCENÍ TVAROVÉHO NAPĚTÍ	115

A – PARAMETRY STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Vstříkolis Engel VC 650H/200V/180 Kombi

- 2 vstřikovací jednotky
- Horizontální D45 mm
- Vertikální D30 mm
- Teplota zpracování až do 400 °C
- Přidržovací síly od 2.6 kN



obr. 0.1 Vstříkolis Engel [29]

Instron 3369

- Kapacita 50 kN
- Maximální rychlost 500 mm/min
- Vertikální rozsah 1193 mm
- Ovládací software: Bluehill
- Rozsah DAQ 500 Hz
- Přesnost měření $\pm 0.5 \%$



obr. 0.2 Instron [30]

Pásová pila Proxxon 27172 MBS 240/E

- Napájecí napětí 230 V
- Rozměr pásu 1065 x 5 x 0.4 mm
- Rychlost pásu 180 – 330 m/min
- Vyložení ramene 150 mm
- Maximální prořez 80 mm



obr. 0.3 Pásová pila Proxxon [31]

HP ZBook 15 G5

- OS Windows 10 Enterprise 64-bit
- Procesor Intel® Core™ i7-8850H CPU @ 2.60 GHz 2.59 GHz
- RAM 32 GB



obr. 0.4 HP ZBook [32]

Digitální světelný mikroskop Keyence VHX 6000

- Hloubkové kompozice
- HDR
- 3D zobrazení topografie dílu
- 3 objektivy: zvětšení 10x – 2000x
- Měření – hrubost, hloubka, rádius atd.
- Širokoúhlé záběry vzorků
- Změny úhlu osvětlení
- Antireflekční mód



obr. 0.5 Světelný mikroskop Keyence [33]

Posuvné měřítko Mitutoyo

- Digitální
- Číslicový krok 0.01 mm
- Přesnost: ≤ 200 mm : ± 0.02 mm ; ≥ 200 mm ± 0.03



obr. 0.6 Posuvné měřítko Mitutoyo [34]

Berstdruck TERMS

- Tlaková destrukční, těsnostní a stabilitní zkouška
- Lineární nárůst tlaku s případnými výdržemi
- Maximální tlak 300 bar (tlaková destrukční)
- Maximální tlak 6 bar (těsnost)
- Gradient nárůstu tlaku od 0.1 do 3 bar/s



obr. 0.7 TERMS [35]

Hexagon DEA Classic 07.07.05

- Rozlišení ≤ 1 μ m
- Operativní teplota 10 – 40 °C
- Minimální rotační krok 5°
- Rychlost rotace 90° za 2 s
- Software: Hexagon PC/DMS/CAD++ 2018R1



obr. 0.8 Hexagon DEA Classic [36]

Tlakové fólie Fujifilm prescale LLW PS

- Dvoulistý typ (A film a C film)
- Polyesterová báze
- Přesnost ± 10 %
- Fólie pro nízké tlaky – 2.5 : 10 MPa



obr. 0.9 Tlakové fólie [37]

Laser Zeltwanger LDF 300-40

- Příkon maximálně 2 kW
- Vlnová délka 940 nm
- Výkon laseru 330 W
- Software Lascon



obr. 0.10 Laser Zeltwanger [38]

B – DODATEK K EXPERIMENTÁLNÍMU MODELOVÁNÍ

B1 – Nejistoty měření

Nejistoty měření byly vyhodnoceny na základě [27].

a) Měření lisovacího průměru víka

- Standardní nejistota typu A (u_A) – směrodatné odchylky z měření (*tab. 0.1*)

tab. 0.1 Směrodatné odchylky z měření průměru víka

Typ víka	MIN	NOM	MAX
Směrodatná odchylka [mm]	0.0173	0.0148	0.0153

- Standardní nejistota typu B (u_B)

Jediným známým zdrojem je rozlišení posuvného měřítka $z=0.02$ mm. Je uvažováno rovnoměrné rozdělení chyb ($\chi=1.73$). Nejistota typu B je poté spočítána jako:

$$u_B = \frac{z}{\chi} = \frac{0.02}{1.73} = 0.0116 \quad (\text{B.1})$$

- Kombinovaná nejistota (u_C) - *tab. 0.2*

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (\text{B.2})$$

tab. 0.2 Kombinovaná nejistota pro víko

Typ víka	MIN	NOM	MAX
u_C [mm]	0.0208	0.0188	0.0192

- Rozšířená nejistota (U) - *tab. 0.3*

Rozsah statistického souboru byl větší jak 30, proto pro statistickou jistotu 99 % je rozšířená nejistota:

$$U = u_C \cdot 2.57 \quad (\text{B.3})$$

tab. 0.3 Rozšířená nejistota pro víko

Typ víka	MIN	NOM	MAX
U [mm]	0.05	0.05	0.05

b) Měření vnitřního průměru tubusu

- Standardní nejistota typu A (u_A) – směrodatné odchylky z měření (*tab. 0.4*)

tab. 0.4 Směrodatné odchylky z měření tubusu

Typ kružnice	Max. vepsaná	Střední	Min. opsaná
Směrodatná odchylka [mm]	0.106	0.012	0.068

- Standardní nejistota typu B (u_B)

Jediným známým zdrojem je rozlišení měřicího přístroje $z=0.001$ mm. Je uvažováno trojúhelníkové rozdělení chyb ($\chi=2.45$). Nejistota typu B je poté spočítána jako:

$$u_B = \frac{z}{\chi} = \frac{0.001}{2.45} = 0.00041 \quad (\text{B.4})$$

- c) Kombinovaná nejistota (
- u_C
-) -
- tab. 0.5*

Stejně jako v (B.2)

tab. 0.5 Kombinovaná nejistota pro tubus

Typ kružnice	Max- vepsaná	Střední	Min. opsaná
u_C [mm]	0.106	0.012	0.068

- d) Rozšířená nejistota (
- U
-) -
- tab. 0.6*

Rozsah statistického souboru byl $n = 25$, proto pro statistickou jistotu 99 % je rozšířená nejistota:

$$U = u_C \cdot k \quad (\text{B.5})$$

Kde k je rovno kvantilu Studentova rozdělení s určitým efektivním počtem stupňů volnosti v_{ef} . Počet byl totožný pro všechny typy kružnic.

$$v_{ef} = (n + 1) \cdot \left(1 + \frac{u_B^2}{u_A^2}\right)^2 - 2 = 2.4 \quad (\text{B.6})$$

Pro $v_{ef}=2.4$ a 99 % statistickou jistotu je $k=2.492$.*tab. 0.6 Rozšířená nejistota pro tubus*

Typ kružnice	Max- vepsaná	Střední	Min. opsaná
U [mm]	0.26	0.03	0.17

- e)
- Měření hloubky zalisování**

Postup byl totožný jako u měřeného průměru víka.

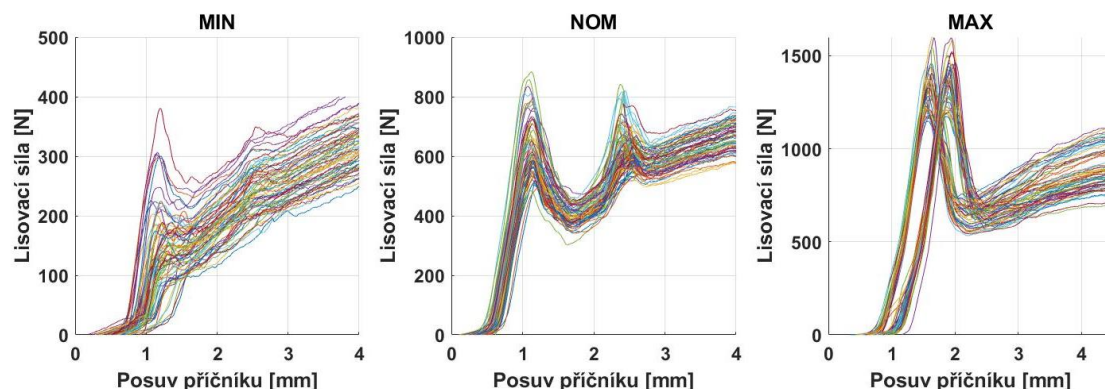
- f)
- Vytlačovací síla**

Analogické s měřením víka s tím rozdílem, že nejistotou typu A byla mediánová absolutní odchylka (MAD). Ta se vypočítá ze vztahu (B.7). Další rozdíl byl ve zdroji nejistoty B, kterým je chyba měřicího zařízení v oblasti $\pm 0.5\%$. Bylo uvažováno rovnoměrné rozdělení chyb a statistická jistota 99 %.

$$MAD = u_A = \text{median}(\text{abs}(x - \text{median}(x))) \quad (\text{B.7})$$

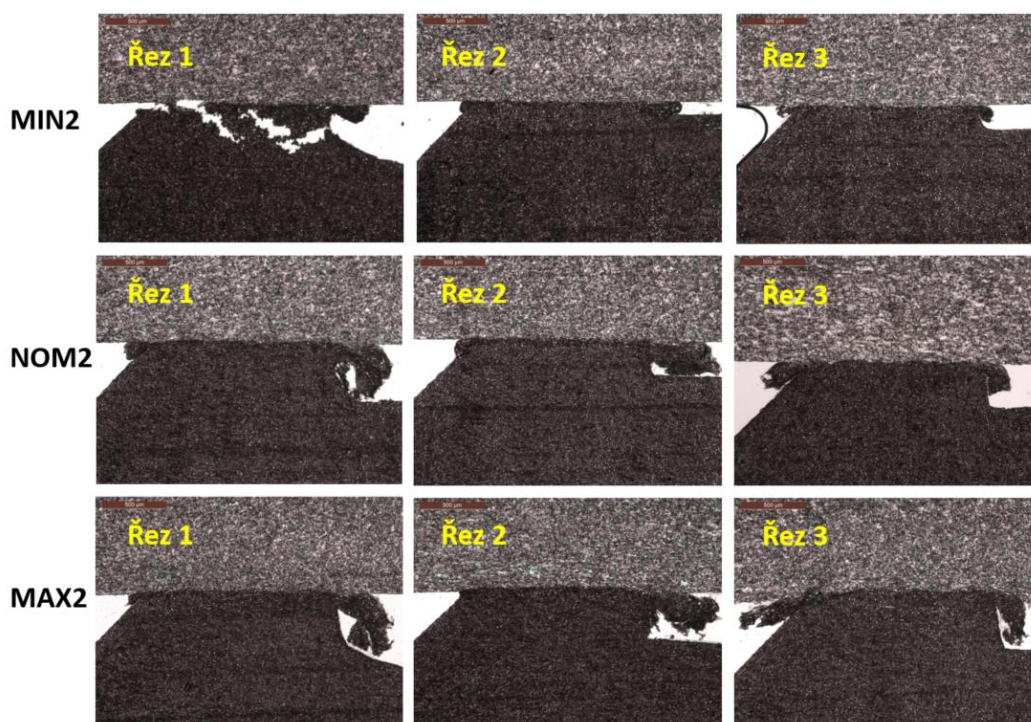
Hodnoty jednotlivých nejistot jsou v *tab. 0.7*.*tab. 0.7 Souhrn nejistot měření pro vytlačování*

SOUBOR	MIN	NOM	MAX
u_A [N]	400	290	900
z [N]	44.25	59.00	66.50
u_B [N]	25.60	34.10	38.44
u_C [N]	401	292	901
U [N]	786	572	1766

B2 – Lisovací proces – experimentální data

obr. 0.11 Záznam lisovací síly

Poznámka k vykreslení závislosti: Ačkoliv byla nastavena podmínka ukončení testu v závislosti na tlakovém protažení, tak z obrázku je patrné, že u vzorků MIN a MAX došlo k překročení limitu. To je způsobeno předběžným testem, jelikož tlakové protažení software začal měřit až po dosažení limitů předběžného testu. To znamená dosažení síly 0.5 N. K tomu docházelo v některých případech až při posuvu příčnicku 0.5 mm z důvodu vymezení vůle mezi dílem B přípravku a tubusem. U vzorků typu MAX lze pozorovat určitý odskok u přibližně poloviny vzorků. To bylo způsobeno nevynulováním pozice příčnicku.

B3 – Mikrotomová analýza – vzorky č. 2

obr. 0.12 Mikrotomové řezy vzorek č. 2

řez 1 u MIN2 vykazuje netěsnost resp. roztrženost. Z výsledků v kap. 11 vyplývá, že se jedná o ojedinělý případ.

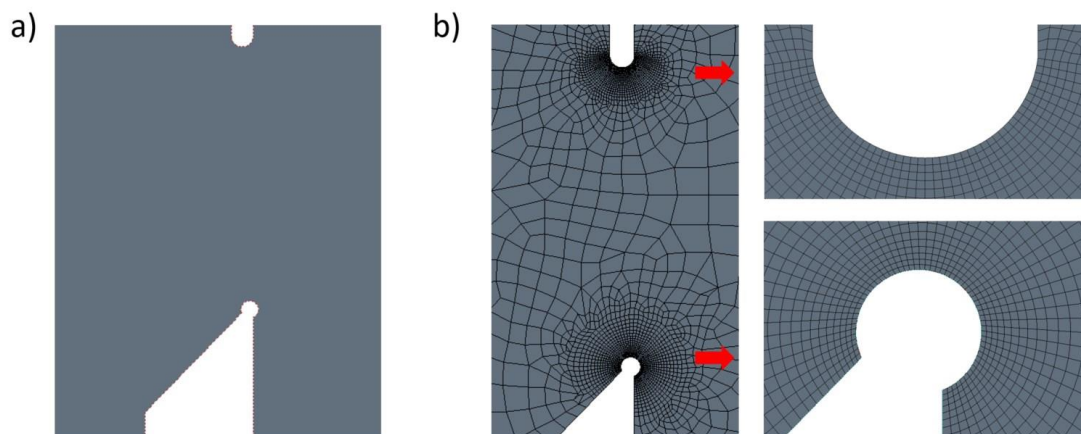
B3 - Tvorba podpůrných výpočtových modelů – modely způsobů testování statické pevnosti svaru

U všech způsobů byla svarová oblast modelována stejným způsobem (viz obr. 0.13a). Model materiálu byl totožný s obr. 0.18 (Ortotropní – GSS). Model sítě je na obr. 0.13b. Použité prvky se shodovaly s kap. 12.5.

Počty prvků pro jednotlivé způsoby jsou v *tab. 0.8*. Model OP byl vytvořen na základě *obr. 10.1*. Velikosti tlaku, resp. posuvů, nejsou podstatné, jelikož výstupem bylo pouze rozložení napětí a ne absolutní hodnoty. Řešení bylo provedeno na jeden časový krok. *Large deflection* bylo zapnuto.

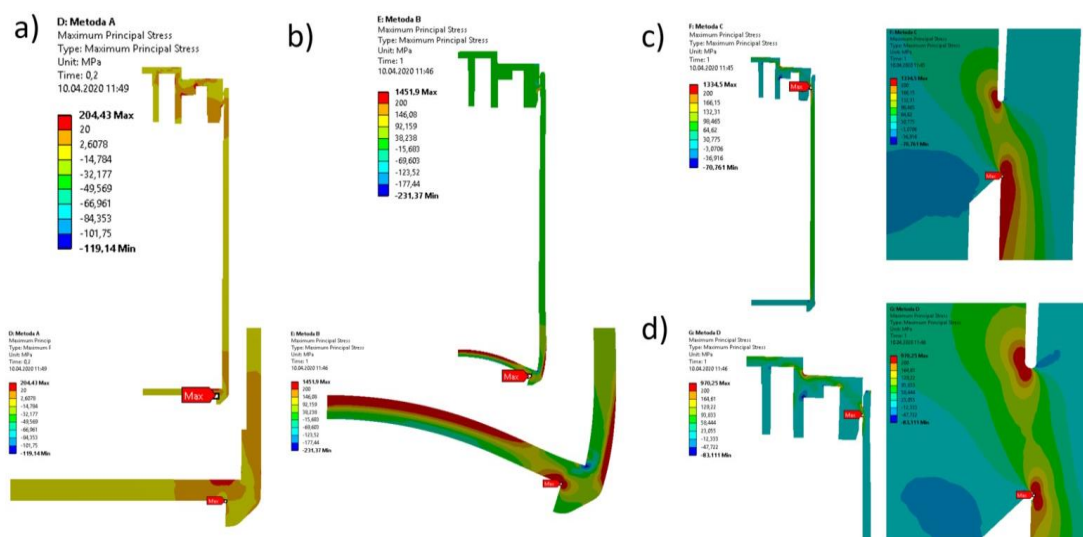
tab. 0.8 Počet prvků pro jednotlivé způsoby

Způsob	a)	b)	c)	d)
Počet prvků	3896	3048	3048	3547



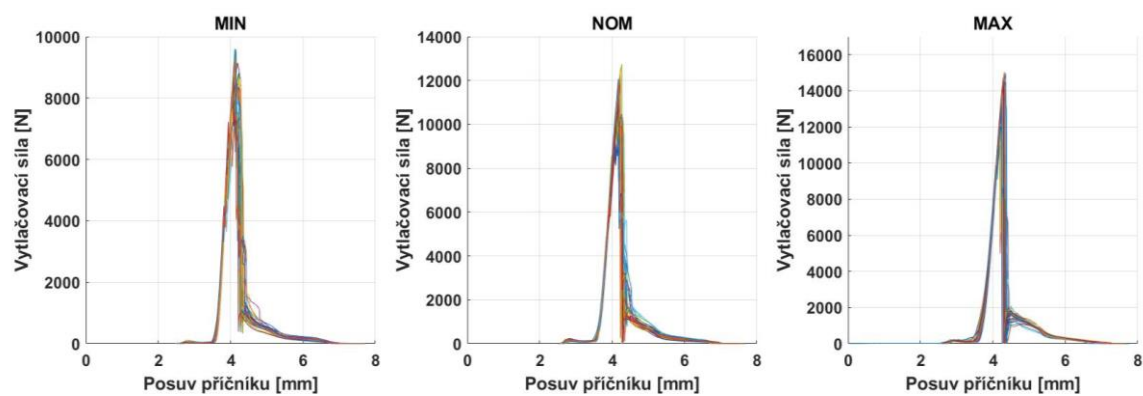
obr. 0.13 a) Model geometrie svaru b) Model sítě

Na *obr. 0.14* je vidět rozložení napětí pro jednotlivé způsoby.



obr. 0.14 Rozložení prvního hlavního napětí pro jednotlivé způsoby statické zkoušky

Poznámka: Výše uvedené výpočty byly vytvořeny na úplném počátku této práce (tzn. i před vystříknutím vzorků). Proto ve výpočtových modelech nejsou zahrnuty poznatky získané z měření, apod. Cílem těchto modelů bylo rozhodnout o způsobu provedení statické zkoušky. To znamená, že byly pouze orientační. Proto jsou vytvořeny na nízké rozlišovací úrovni. Ze stejného důvodu bylo využito metody efektivních vrubových napětí namísto vhodnějších tvarových napětí.

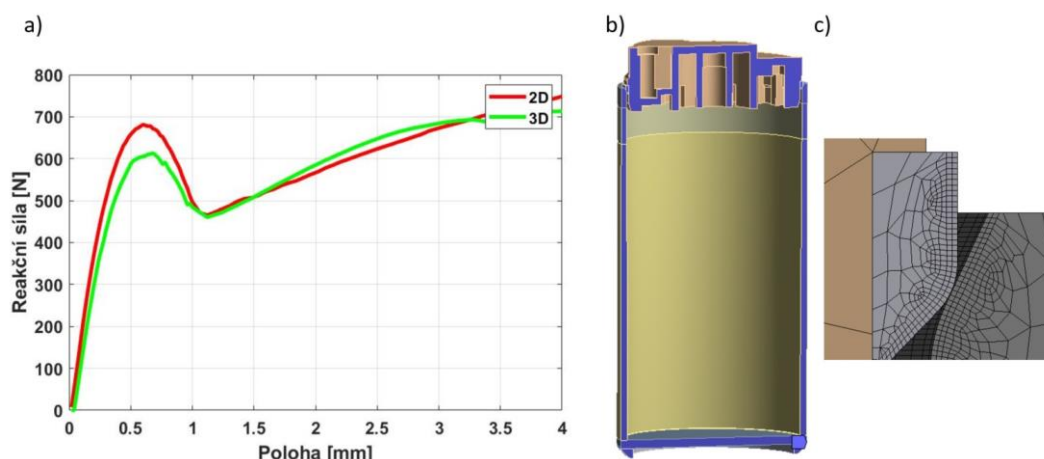
B4 - Vytlačování – experimentální data*obr. 0.15 Záznam vytlačovací síly*

C – DODATEK K VÝPOČTOVÉMU MODELOVÁNÍ

C1 – Ověření rotační symetrie

Na obr. 0.16a je zobrazena reakční síla v závislosti na posuvu pro 3D a 2D výpočtový model. Výpočty byly provedeny pro typ NOM. V tomto případě byly rozměry modelů geometrie totožné s výrobním výkresem u 3D i 2D, tzn. že nebyly použity úpravy, viz obr. 12.2. Model materiálu byl totožný s kap. 12.3. Stejně tak i nastavení modelu styku těles, modelu sítě a modelu OP bylo totožné s kap. 12.4, 12.5 a 12.6. Jediná změna byla u modelů sítě (hrubší síť z důvodu délky výpočtu – přes 8 h) a OP (symetrie) pro 3D model, viz obr. 0.16b,c.

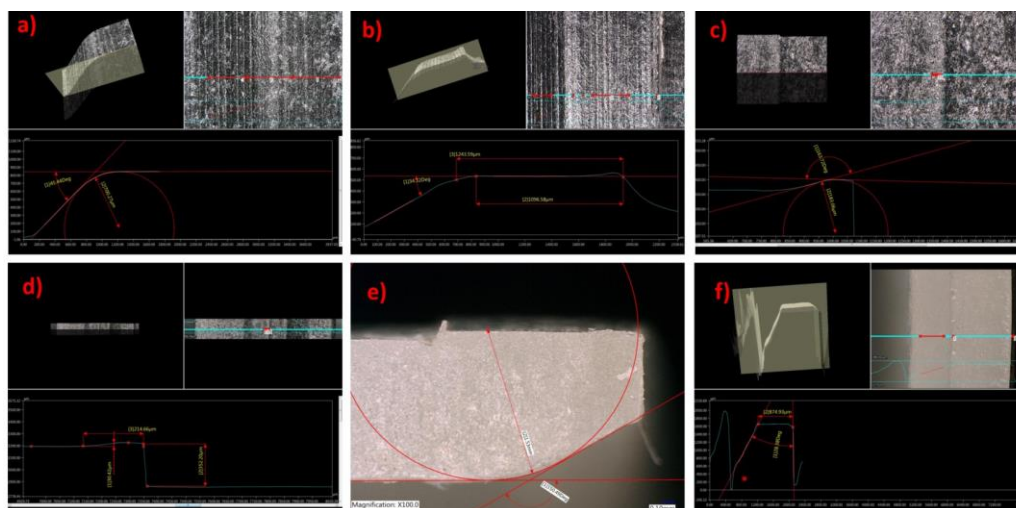
Kontaktní tlak nebyl srovnáván z důvodu diametrálně rozdílné kvality sítě. Na základě obr. 0.16a lze tvrdit, že je možné využít rotační symetrie i přes dříve zmíněné odchylky.



obr. 0.16 Vliv dimenze úlohy na reakční sílu

a) reakční síla v ose y v závislosti na posuvu b) změna v modelu OP pro 3D – frictionless support (modrá barva) c) detail hrubé sítě v 3D modelu

C2 – Snímky z mikroskopu Keyence

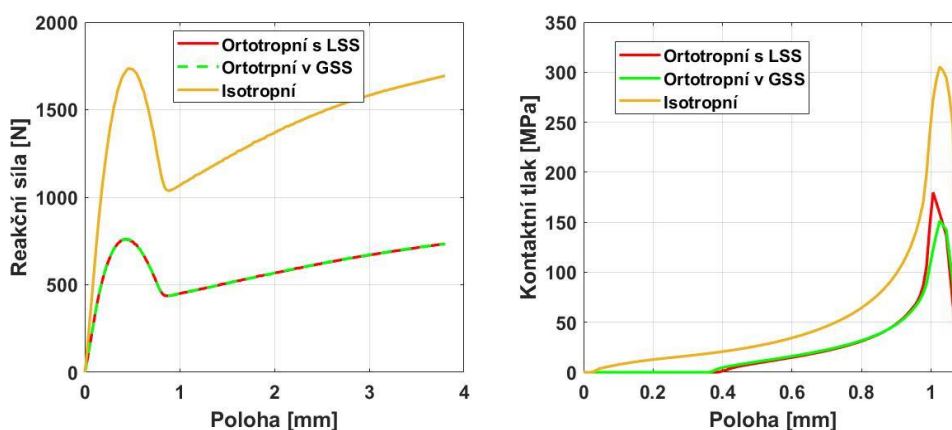


obr. 0.17 Zbylé snímky z mikroskopu Keyence

měření: a) zaoblení vika b) šířky svarové oblasti c) zaoblení otřepu d) ostatních rozměrů otřepu e) zaoblení tubusu f) ostatních rozměrů tubusu

C3 – Vliv modelu materiálu

Na obr. 0.18 je porovnání reakčních sil a kontaktních tlaků pro různé modely materiálu. Z obrázků vyplývá, že isotropní model zvyšuje celkovou tuhost soustavy. V rámci reakční síly není rozdíl mezi ortotropním v LSS a v GSS (vlákna jsou všude dle globálního souřadného systému). Rozdíl je ale ve velikosti kontaktního tlaku, kdy pro ortotropní model v GSS je špičková hodnota o 30 MPa nižší.

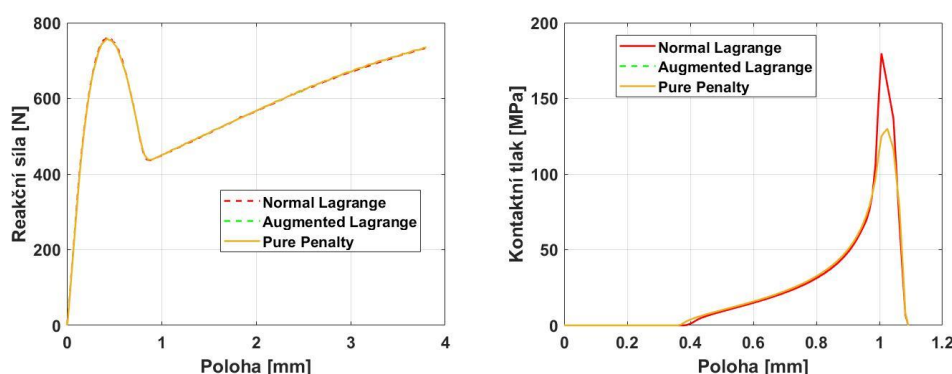


obr. 0.18 Vliv modelu materiálu (vlevo – reakční síla; vpravo – kontaktní tlak)

ortotropní v LSS – použitý model; ortotropní v GSS – model bez využití znalostí z MFA; isotropní model materiálu – $E = 14\,500\text{ MPa}$ a $\mu = 0.3$

C4 – Vliv formulace kontaktu

Na obr. 0.19 je porovnání reakčních sil a kontaktních tlaků pro různé formulace kontaktu *frictional* (pro $f=0.18$). Z obrázků vyplývá, že z hlediska reakční síly je možné použít všechny formulace. Z hlediska kontaktního tlaku jsou průběhy totožné až na špičkové hodnoty. To je z toho důvodu, že formulace Augmented Lagrange a Pure Penalty dovolují penetraci povrchů, takže v místě zaoblení dochází k větším penetracím a tím i snížení velikosti kontaktního tlaku. Dále u těchto formulací docházelo k oscilaci kontaktního tlaku po aplikaci teploty. Proto byla vybrána formulace Normal Lagrange. Při nastavení dostatečně malé limitní penetrace povrchů (špatná konvergence) dávají všechny formulace stejné výsledky.

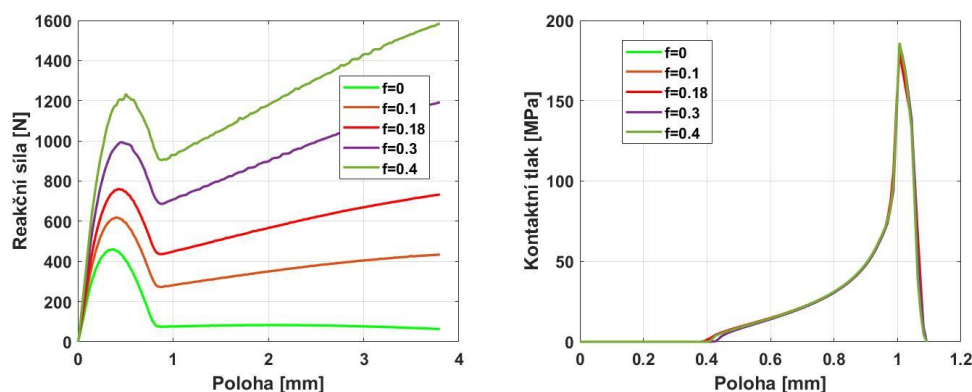


obr. 0.19 Vliv formulace kontaktu (vlevo – reakční síla; vpravo – kontaktní tlak)

C5 – Vliv součinitele tření

Na obr. 0.20 je porovnání reakčních sil a kontaktních tlaků pro různé hodnoty součinitele tření. Vše bylo vypočteno pro formulaci Normal Lagrange. Z obrázku vyplývá, že součinitel tření ovlivňuje pouze průběh reakční síly a nikoliv kontaktní tlak. S rostoucím součinitelem tření se zvětšuje směrnice růstu síly a její maximální

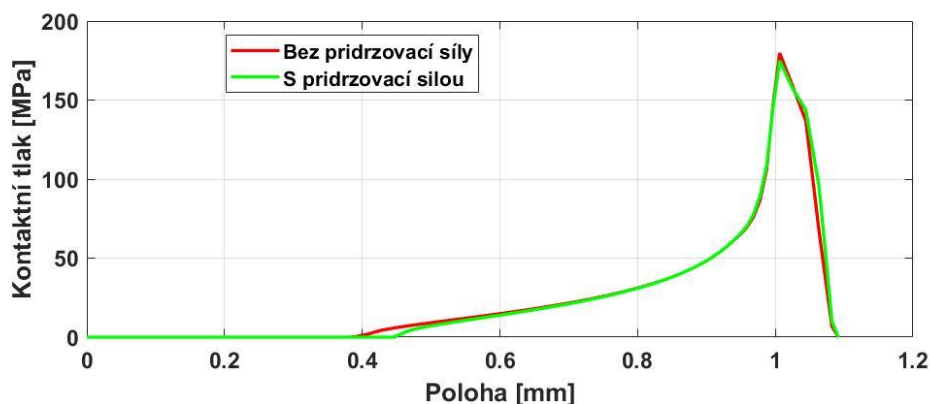
hodnota. Právě na základě sklonu (směrnice) a maximální síly v oblasti přechodu byla určena odpovídající velikost součinitele tření.



obr. 0.20 Vliv součinitele tření (vlevo – reakční síla; vpravo – kontaktní tlak)

C6 – Vliv přidržovací síly

Na obr. 0.21 je porovnání kontaktního tlaku pro výpočet s přidržovací silou a bez ní. Přidržovací síla byla implementována do modelu v rámci OP. Byl přidán další (čtvrtý) krok, ve kterém byla zrušena OP na dně tubusu a na totožné místo byla aplikována síla 1270 N ve směru osy y. Dále bylo zamezeno posuvu ve směru y horní hraně tubusu. Protože Ansys vztahuje deformační OP k výchozí poloze a ne ke koncové z předcházejícího kroku, bylo nutné dopsat příkaz v jazyce APDL pro zajištění správnosti OP (viz obr. 0.22). Z obr. 0.21 vyplývá, že vliv přidržovací síly je nepodstatný z hlediska řešeného problému.



obr. 0.21 Vliv přidržovací síly na rozložení kontaktního tlaku

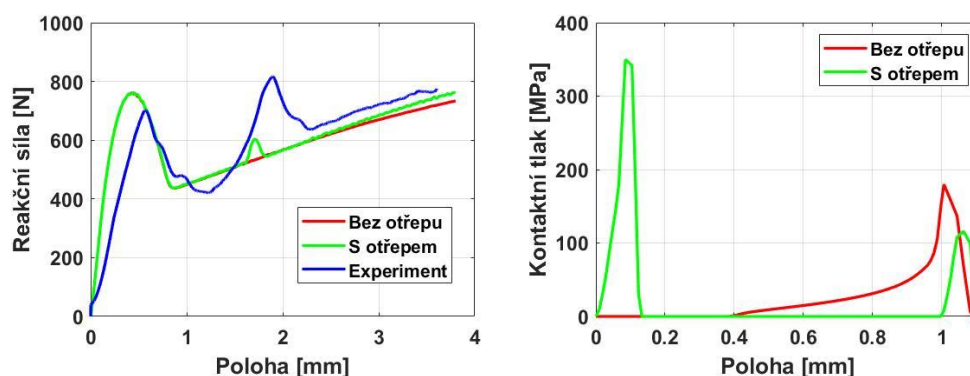
```
D,my_pilot,UY,%_FIX% !a null load step; displacement held constant
```

obr. 0.22 Použitý příkaz pro zajištění OP (zákaz posuvu) od koncové pozice předcházejícího kroku
poznámka: my_pilot je pojmenování pro „remote point“, který byl vytvořen na vrchní hraně tubusu

C7 – Vliv otřepu

Otřep byl modelován na základě obr. 12.4. Ostatní nastavení výpočtu zůstalo nezměněno. Na obr. 0.23 je průběh reakční síly a rozložení kontaktního tlaku bez a s otřepem. Z obrázku vyplývá, že druhý nárůst síly z experimentálního měření u vzorků NOM způsobuje právě zmíněný otřep. Dále je vidět, že otřep naprosto mění rozložení a velikost kontaktního tlaku. V tomto případě ale není možné vytvořit výpočtový model s otřepem a to z toho důvodu, že otřep byl pozorován (experimentální data) a změřen pouze u typu NOM. Dále se

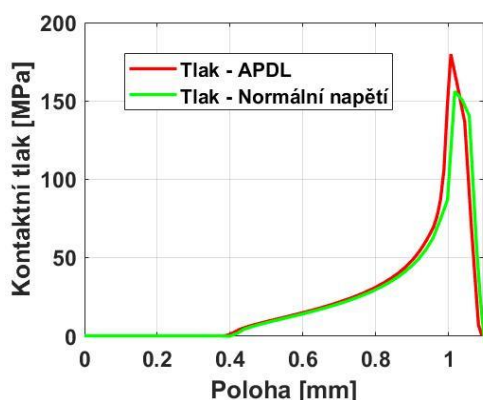
předpokládá, že otřep byl při svarování roztaven a vytlačen mimo svarovou oblast, a proto je pokládán za nepodstatný.



obr. 0.23 Vliv otřepu (vlevo – reakční síla; vpravo – kontaktní tlak)

C8 – Vyhodnocení kontaktního tlaku

Na obr. 0.24 je výsledné rozložení kontaktního tlaku pro typ NOM získané dvěma rozdílnými přístupy. „Tlak – APDL“ byl získán pomocí příkazu, viz obr. 0.25. „Tlak – Normální napětí“ byl získán jako záporně vzatá hodnota normálního napětí v ose x (normála ke stykové ploše). Z obrázku vyplývá, že rozdíl ve špičce napětí je cca. 25 MPa. Je to z důvodu natočení tubusu při deformaci a tím natočení jeho normály ke stykovému povrchu. Proto bylo nutné použít přístup „Tlak – APDL“.



obr. 0.24 Rozdíl v přístupech pro vyhodnocení kontaktního tlaku

```

/gopr
/post1
set,last
cnsel,s,n1
*get,n1,node,,num,min
cnsel,s,n2
*get,n2,node,,num,min
allsel
!
PATH,cesta,2,500,500,
PPATH,1,n11
PPATH,2,n22
PDEF,tlak,CONT,PRES,AVG
/show,png
PLPATH,TLAK
/show,close
/PAGE,TRACPOIN,POIN
/PAGE,TRACDATA,TABL
*dim,my_names,char,1,2
my_names(1,1)='length'
my_names(1,2)='pressure'
*CFOPEN,rovna_nom,txt
*VWRITE,my_names(1,1),my_names(1,2)
(2a16)
*VWRITE,TRACDATA(1,4),TRACDATA(1,5)
(2F16.4)
*CFCLOSE
  
```

obr. 0.25 Příkaz pro vyhodnocení kontaktního tlaku po cestě v Ansys Workbench

C9 – Citlivostní analýza

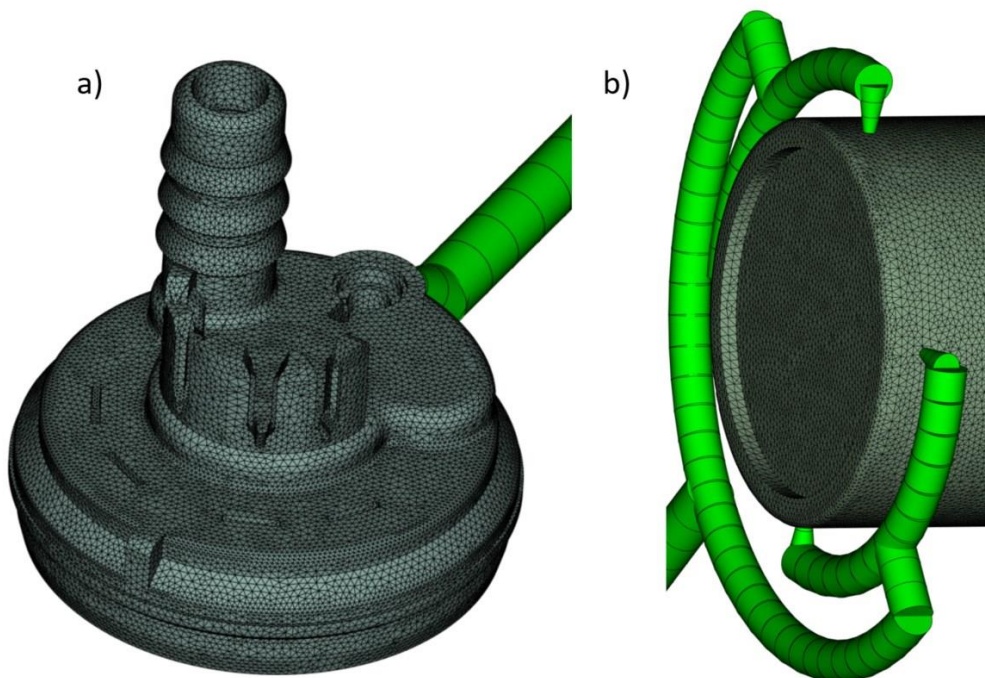
Citlivostní analýza byla vytvořena v softwaru Optislang. Vstupní rozsahy veličin byly FKN: < 0.1;10 >, FKT: < 0;10 >, šířka svaru: < 1.05;1.25 > a vzdálenost svařenců: < 0.1;0.5 >. Z těchto intervalů byly na základě vzorkování *Advanced Latine Hypercube* vytvořeny návrhové body. Pro ně byly vytvořeny simulace, jejichž výstupem bylo první hlavní napětí ve svaru. Na základě těchto výsledků byl vytvořen tzv. *Metamodel (odezvozá plocha)*. Testované metamodely byly: polynomický, MLS (moving least squares) a metoda Kriging. Zároveň byla nastavena redukce vstupních parametrů, pokud parametry nemají na výstup vliv (případ FKN a FKT). Hlavním výstupem z této analýzy byla tzv. CoP matrix – matice koeficientů prognózy.

D – MOLDFLOW ANALÝZA

Model geometrie pro MFA byl totožný s 3D modely z *obr. 12.5* a *obr. 12.6*. Model materiálu byl získaný z knihovny softwaru Autodesk Insight, kde jsou uvedeny změřené teplotní závislosti pro materiál Grivory HTV 4H1. Model okrajových podmínek byl nastavený dle *kap. 9.2.2*. Model sítě byl vytvořen pomocí prvků: *3D Tetrahedra* a *Beam*. Prvky *Beam* byly použity pro modelování vtoků. V *tab. 0.9* jsou uvedeny počty použitých prvků. Ukázka sítě je na *obr. 0.26*.

tab. 0.9 Počet použitých prvků pro víko a tubus

Díl	Víko	Tubus
3D Tetrahedra	1 279 841	1 476 935
Beam	45	102



obr. 0.26 Použitá síť v MFA a) víko b) tubus

Model orientace vláken byl nastaven jako „Moldflow rotational diffusion“ s parametry $D1=1$, $D2=0.5$ a $D3=0.3$. Procesní parametry jsou na *obr. 0.27a* pro víko a na *obr. 0.27b* pro tubus.

a)	b)
Process Settings: ===== Machine parameters: Maximum injection pressure = 1.8000E+02 MPa Maximum machine clamp force = 1.0000E+02 tonne Apply the clamp force limit = No Maximum machine injection rate = 7.0000E+01 cm ³ /s Machine hydraulic response time = 2.0000E-01 s ----- Temperature control: Melt temperature = 330.00 C Mold temperature = 160.00 C Mold-melt heat transfer coefficients Global values. (Superseded by any values set on individual elements.) Filling = 5000.0000 W/m ² -C Packing = 2500.0000 W/m ² -C Detached = 1250.0000 W/m ² -C Atmospheric temperature = 25.00 C ----- Filling Control: Filling control type = Injection time Fill time = 1.40 s Stroke volume determination = Automatic ----- Velocity/pressure switch-over control: Velocity/pressure switch-over control type = By %volume filled Percentage volume of the part = 99.00 % ----- Pack/holding control: Pack/holding control type = %Filling pressure vs time Pressure profile: duration % filling pressure 0.00 s 80.00 2.00 s 80.00 1.00 s 40.00 ----- Cooling time: Cooling time determination = Specified Cooling time = 25.0000 s	Process Settings: ===== Machine parameters: Maximum injection pressure = 1.8000E+02 MPa Maximum machine clamp force = 2.0000E+02 tonne Apply the clamp force limit = No Maximum machine injection rate = 1.3200E+02 cm ³ /s Machine hydraulic response time = 2.0000E-01 s ----- Temperature control: Melt temperature = 330.00 C Mold temperature = 160.00 C Mold-melt heat transfer coefficients Global values. (Superseded by any values set on individual elements.) Filling = 5000.0000 W/m ² -C Packing = 2500.0000 W/m ² -C Detached = 1250.0000 W/m ² -C Atmospheric temperature = 25.00 C ----- Filling Control: Filling control type = Injection time Fill time = 1.69 s Stroke volume determination = Automatic ----- Velocity/pressure switch-over control: Velocity/pressure switch-over control type = By %volume filled Percentage volume of the part = 99.00 % ----- Pack/holding control: Pack/holding control type = %Filling pressure vs time Pressure profile: duration % filling pressure 0.00 s 80.00 2.00 s 80.00 1.00 s 40.00 ----- Cooling time: Cooling time determination = Specified Cooling time = 25.0000 s

obr. 0.27 Procesní parametry pro MFA a) víko b) tubus

Nastavení řešiče bylo totožné pro oba díly a je na obr. 0.28.

Solver Parameters: =====	
Solver setup: -----	
Solver	= Coupled 3D
Solution type	= Stokes
Simulate inertia effect	= No
Simulate gravity effect	= No
Simulate wall slip	= No
Gate diameter at cavity injection locations	= Specified as 5.000 mm
Filling parameters: -----	
Maximum %volume to fill per time step	= 1.000 %
Maximum iterations per time step	= 50
Convergence tolerance (scaling factor)	= 1.000
Flow front scheme	= Level set
Packing parameters: -----	
Maximum time step	= 0.500 s
Maximum iterations per time step	= 50
Convergence tolerance (scaling factor)	= 1.000
Intermediate results: -----	
Intermediate results type	= Write at constant intervals
Number of intermediate results in filling phase	= 60
Number of intermediate results in packing phase	= 60
Number of intermediate results in cooling phase	= 40

obr. 0.28 Nastavení řešiče pro MFA

E – VYHODNOCENÍ TVAROVÉHO NAPĚTÍ

Skript pro převzorkování a vyhodnocení tvarového napětí

```

clc; clear all; close all;

%%Vyhodnocení tvarového napětí
vstup=xlsread("vstup.xlsx");
min=vstup(:,1:2);
nom=vstup(:,3:4);
max=vstup(:,5:6);

Tmin=(min(2,1)-min(1,1)); %vzorkovací perioda
fmin=1/Tmin; %vzorkovací frekvence
TminNew=0.01; %nova perioda
delka_min_new=0:TminNew:min(end,1); %nová delka seignalu
sigma_min_new=interp1(min(:,1),min(:,2),delka_min_new,'spline');%nove y signalu
min_new=transpose([delka_min_new;sigma_min_new]);
Tnom=(nom(2,1)-nom(1,1)); %vzorkovací perioda
fnom=1/Tnom; %vzorkovací frekvence
TnomNew=0.01; %nova perioda
delka_nom_new=0:TnomNew:nom(end,1); %nová delka seignalu
sigma_nom_new=interp1(nom(:,1),nom(:,2),delka_nom_new,'spline');%nove y signalu
nom_new=transpose([delka_nom_new;sigma_nom_new]);
Tmax=(max(2,1)-max(1,1)); %vzorkovací perioda
fmax=1/Tmax; %vzorkovací frekvence
TmaxNew=0.01; %nova perioda
delka_max_new=0:TmaxNew:max(end,1); %nová delka seignalu
sigma_max_new=interp1(max(:,1),max(:,2),delka_max_new,'spline');%nove y signalu
max_new=transpose([delka_max_new;sigma_max_new]);

%%TVAROVÉ NAPĚTÍ
t=1.5; %tloušťka tubusu
vzdalenost=[0 0.4*t 0.9*t 1.4*t];

%%MIN
x04=round((0.4*t)/TminNew)+1;
x09=round((0.9*t)/TminNew)+1;
x14=round((1.4*t)/TminNew)+1;
%kvadratická extrapolace
sigma_min04=min_new(x04,2);
sigma_min09=min_new(x09,2);
sigma_min14=min_new(x14,2);
sigma_minst=2.52*sigma_min04-2.24*sigma_min09+0.72*sigma_min14;
sigma_min_st=[sigma_minst sigma_min04 sigma_min09 sigma_min14];
min_st_kv=transpose([vzdalenost;sigma_min_st]);

%%NOM
%kvadratická extrapolace
sigma_nom04=nom_new(x04,2);
sigma_nom09=nom_new(x09,2);
sigma_nom14=nom_new(x14,2);
sigma_nomst=2.52*sigma_nom04-2.24*sigma_nom09+0.72*sigma_nom14;
sigma_nom_st=[sigma_nomst sigma_nom04 sigma_nom09 sigma_nom14];
nom_st_kv=transpose([vzdalenost;sigma_nom_st]);

%%MAX
%kvadratická extrapolace
sigma_max04=max_new(x04,2);
sigma_max09=max_new(x09,2);
sigma_max14=max_new(x14,2);
sigma_maxst=2.52*sigma_max04-2.24*sigma_max09+0.72*sigma_max14;
sigma_max_st=[sigma_maxst sigma_max04 sigma_max09 sigma_max14];
max_st_kv=transpose([vzdalenost;sigma_max_st]);

```